



Universidad
Carlos III de Madrid

INGENIERÍA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Verificaciones de modelos de vehículos ferroviarios de alta velocidad
equipados con suspensión semiactiva magnetoreológica mediante
distintos programas**

Autor: Dña. LAURA MUÑOZ PORTERO

Tutor: D. FRANCISCO JOSÉ RODRÍGUEZ URBANO

Director: D. RUBÉN OLIVA DOMÍNGUEZ

Leganés, Octubre de 2016

Agradecimientos

Este Proyecto es el fin de un período largo y duro, que no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, por eso les doy las gracias a todos ellos, en especial a mi madre por darme la oportunidad de estudiar.

También quiero agradecer a mis tutores de este Proyecto su ayuda, que ha sido indispensable para la realización del mismo.

A Dioni.

De nuevo gracias a todos.

Resumen

El objetivo de este Proyecto es la simulación de un ferrocarril con amortiguadores magnetoreológicos. Para el desarrollo del amortiguador y el vehículo se han utilizado los programas Simpack y Simulink. Con estos programas se hacen varias simulaciones, que permiten estudiar diferentes parámetros del sistema. De este modo se puede observar el comportamiento del vehículo y obtener diferentes conclusiones.

Palabras clave

Tren, suspensión semiactiva, amortiguador magnetoreológico, Simulink, Simpack.

Abstract

The aim of this Project is the simulation of a railway with magnetorheological dampers. For the development of the damper and the railway vehicle have been used Simulink program and Simpack program. With these programs several simulations are made, these simulations allow us to study different system parameters. In this way, it can be observed the behavior of the railway and get different conclusions.

Keywords

Train, semiactive suspension, magnetorheological damper, Simulink, Simpack.

Índice general

CAPÍTULO 1: Introducción y objetivos	2
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Fases del desarrollo.....	5
1.4. Estructura del documento	6
CAPÍTULO 2: Estado del arte	9
2.1. Historia de los ferrocarriles. Trenes en España.....	11
2.1.1. Historia de los ferrocarriles.....	11
2.1.2. Ferrocarriles en España.....	12
2.2 Elementos de un tren.....	14
2.3 Sistema de suspensión en ferrocarriles	20
2.3.1 Elementos de suspensión	20
2.3.2 Suspensión primaria y secundaria	23
2.3.3 Tipos de suspensión.....	28
CAPÍTULO 3: Reología.....	31
3.1 Fluidos magnetoreológicos	33
3.1.1. Componentes de un fluido MR	34
3.1.2 Reología y Propiedades de un fluido MR.....	36
3.1.3 Funcionamiento de la tecnología.....	41
3.1.4 Modos y Aplicaciones	43
3.2 Amortiguadores magnetoreológicos	48
CAPÍTULO 4: Modelado del amortiguador magnetoreológico en Simulink.....	51
4.1 Modelo de Bouc-Wen mejorado.....	53
4.2 Modelado en Simulink	56
CAPÍTULO 5: Modelo de vehículo de 9 GDL	63
5.1 Ecuaciones del modelo de 9 GDL.....	65
5.2 Modelo en Simulink	67
5.3 Resultados del modelo y conclusiones	70
CAPÍTULO 6: Modelado del tren en Simpack	77
6.1 Simpack	79
6.2 Modelo del tren	81
CAPÍTULO 7: Redes Neuronales	85

7.1 Redes neuronales	87
7.2 Red Neuronal en Simulink.....	91
7.2.1. Obtención de los valores de la red	91
7.2.2. Creación de la red con comando nstart.....	92
7.2.3. Creación del archivo .dll con comando mex -setup	94
7.2.4. Implementación en el programa Simpack	95
CAPÍTULO 8: Resultados y conclusiones	99
8.1 Resultados	101
8.2 Conclusiones	108
CAPÍTULO 9: Conclusiones y trabajos futuros	111
9.1 Conclusiones	113
9.2 Trabajos futuros	114
CAPÍTULO 10: Planificación y Presupuesto	115
10.1 Planificación	117
10.2 Análisis de costes	119
Anexos.....	121
ANEXO A: Construcción y datos del tren	123
ANEXO B: Fórmulas de un modelo de 9 GDL	133
Bibliografía	135

Índice de figuras

Figura 2.1. Locomotora "Rocket" [4].....	12
Figura 2.2. Vehículo ferroviario.....	14
Figura 2.3. Caja de grasa con suspensión primaria de muelles helicoidales.....	15
Figura 2.4. Caja de grasa	15
Figura 2.5. Esquema de una rueda ferroviaria	16
Figura 2.6. Eje montado	17
Figura 2.7. Bogie de vehículo de pasajeros	17
Figura 2.8. Bastidor de un bogie en chapa soldada	18
Figura 2.9. Ballesta	20
Figura 2.10. Muelle helicoidal	21
Figura 2.11. Barra de torsión.....	21
Figura 2.12. Esquema suspensión primaria y secundaria	23
Figura 2.13. Efecto de la suspensión primaria en el guiado de la rueda.....	24
Figura 2.14. Apoyo vertical con elementos elásticos independientes.....	24
Figura 2.15 Apoyo vertical por elementos elásticos conjugados y ecualización de fuerzas entre dos ejes con suspensión de ballesta	25
Figura 2.16. Disposición de un bogie de cuatro ruedas con "semiecualización" de la carga y apoyo vertical por balancín entre cajas	25
Figura 2.17. Suspensión primaria de brazo articulado longitudinal.....	25
Figura 2.18. Arrastre por bieleta única	26
Figura 2.19. Soporte vertical por pivote central cilíndrico o esférico	27
Figura 2.20. Suspensión pasiva	28
Figura 2.21. Suspensión activa	29
Figura 2.22. Suspensión semiactiva	30
Figura 3.1. Materiales inteligentes de mayor interés para el sector de transporte	33
Figura 3.2. Fuerza de cizalla entre dos planos paralelos.....	37
Figura 3.3. Desarrollo del perfil de velocidad	38
Figura 3.4. Fluido Newtoniano	39
Figura 3.5. Comparación de los modelos Bingham y Newton	40
Figura 3.6. Fluido MR (1. Base fluida, 2. Partículas magnetizables).....	41
Figura 3.7. Fluido MR con campo magnético externo	41
Figura 3.8. Modo de cizalladura	44

Figura 3.9. Freno con fluido MR	45
Figura 3.10. Diferentes tipos de diseños de frenos MR: a) de tambor, b) de tambor invertido, c) rotor en forma de T, d) discos, e) discos múltiples.	46
Figura 3.11. Modo comprimido.....	46
Figura 3.12. Modo de flujo	47
Figura 3.13. Amortiguador convencional.....	48
Figura 3.14. Amortiguador de fluido MR	48
Figura 3.15. Geometrías de los amortiguadores monotubo funcionando en: a) modo válvula y b) modo válvula y cizalladura	49
Figura 3.16. Esquema de un amortiguador bitubo	50
Figura 3.17. Amortiguador de doble barra o doble salida	50
Figura 4.1. Modelo mecánico para MR amortiguador	53
Figura 4.2. Ciclo de histéresis para materiales elásticos	54
Figura 4.3. Detalle del ciclo de histéresis para materiales elásticos	55
Figura 4.4. Ecuaciones de α , c_0 , c_1 , y u en Simulink	57
Figura 4.5. Ecuación de y en Simulink	58
Figura 4.6. Ecuación de z en Simulink	59
Figura 4.7. Ecuación de la fuerza del amortiguador en Simulink	59
Figura 4.8. Modelo de Bouc-Wen en Simulink.....	60
Figura 4.9. Resultados experimentales de Spencer et. al.	61
Figura 4.10. Resultados del modelo de amortiguador MR	61
Figura 5.1. Modelo de 9 GDL de un vehículo ferroviario con amortiguadores MR(MRD).....	65
Figura 5.2. Modelo de 9 GDL en Simulink	67
Figura 5.3. Continuación del modelo de 9 GDL en Simulink	69
Figura 5.4. Desplazamiento vertical del vagón para 5 voltajes diferentes	70
Figura 5.5. Aumento de la gráfica del desplazamiento vertical para 5 voltajes diferentes.....	71
Figura 5.6. Aceleración vertical del vagón	71
Figura 5.7. Movimiento de aceleración de cabeceo del vagón.....	72
Figura 5.8. Movimiento vertical de los dos bogies.....	72
Figura 5.9. Aceleración de los pasajeros en los cuatro puntos	73
Figura 5.10. Comparativa desplazamiento vertical entre dos excitaciones.....	73
Figura 6.1. Módulo Pre de Simpack	79
Figura 6.2. Módulo Post de Simpack.....	80
Figura 6.3. Bogie del vehículo	81
Figura 6.4. Markers del bogie y dummy.....	81

Figura 6.5. Suspensión primaria en Simpack.....	82
Figura 6.6. Suspensión secundaria en Simpack.....	82
Figura 6.7. Amortiguadores MR en Simpack.....	83
Figura 6.8. Modelo de tren completo en Simpack.....	83
Figura 7.1. Estructura general de una neurona[24]	87
Figura 7.2. Salto sináptico	88
Figura 7.3. Esquema de Neurona	88
Figura 7.4. Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada	89
Figura 7.5. Esquema del proceso de decisión	89
Figura 7.6. Esquema de la red neuronal usada en MATLAB	92
Figura 7.7. Entrenamiento de la red neuronal.....	92
Figura 7.8. Modelo de red neuronal en Simulink.....	93
Figura 7.9. Esquema de red para creación de archivo.dll	94
Figura 7.10. Valores de entrada de los sensores.....	96
Figura 7.11. Posición del marcador del suelo	96
Figura 7.12. Posiciones de los marcadores del bogie y del dummy.....	97
Figura 7.13. Valores de entrada del elemento de control MatSIM	97
Figura 8.1. Función de excitación de la vía.....	101
Figura 8.2. Valores de salida de las 4 fuerzas del amortiguador.....	101
Figura 8.3. Desplazamiento vertical del vagón	102
Figura 8.4. Aceleración vertical del vagón	102
Figura 8.5. Aceleración del ángulo de cabeceo del vagón	103
Figura 8.6. Segunda función de excitación de la vía	103
Figura 8.7. Valores de salida de las 4 fuerzas del amortiguador para segunda excitación.....	104
Figura 8.8. Desplazamiento vertical del vagón para segunda excitación	104
Figura 8.9. Aceleración vertical del vagón para segunda excitación	105
Figura 8.10. Aceleración del ángulo de cabeceo del vagón para segunda excitación	105
Figura 8.11. Comparación excitación de Simpack y Simulink	106
Figura 8.12. Comparación entre el modelo de Simpack y Simulink (Simpack)	107
Figura 8.13. Comparación entre el modelo de Simpack y Simulink (Simulink).....	107
Figura 8.14. Comparación entre las señales de entrada para las dos excitaciones de la vía....	108
Figura 10.1. Diagrama de Gantt del Proyecto.....	118
Figura A.1. Momentos de inercia y centro de gravedad del bogie	124
Figura A.2. Propiedades del cuerpo bogie	124
Figura A.3. Propiedades de los muelles de la suspensión primaria	126

Figura A.4. Función I_PrimDamper	127
Figura A.5. Propiedades del amortiguador de la suspensión primaria	127
Figura A.6. Propiedades de los muelles de la suspensión secundaria	128
Figura A.7. Propiedades de la barra antitorsión y el "bumpstop"	129
Figura A.8. Momentos de inercia y centro de gravedad del vagón	130
Figura A.9. Propiedades del vagón.....	131
Figura A.10. Joint del vagón	132
Figura A.11. Joint del dummy.....	132

Índice de tablas

Tabla 3.1. Desventajas del freno convencional y ventajas del freno MR	45
Tabla 4.1. Parámetros para el modelo de amortiguador MR (Spencer Jr. et al. , 1997)	54
Tabla 4.2. Simbología Simulink.....	56
Tabla 7.1. Valores de amplitud y voltaje para la red neuronal	91
Tabla 7.2. Desglose de sensores y elementos de control en Simpack	95
Tabla 10.1. Costes del personal.....	119
Tabla 10.2. Coste del soporte físico	119
Tabla 10.3. Coste del soporte informático	119
Tabla 10.4. Coste total	120
Tabla A.1. Marcadores de la suspensión primaria	123
Tabla A.2. Posiciones de los marcadores de la suspensión.....	125
Tabla A.3. Marcadores del dummy	125
Tabla B.1. Parámetros del vehículo.....	134

CAPÍTULO 1: Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Las irregularidades de la vía afectan al confort de los pasajeros, principalmente por la elevada masa del vehículo, así como de la superficie de contacto entre rueda y carril que es muy pequeña. El sector del transporte ha sufrido importantes cambios. En concreto en el sector ferroviario, ha aumentado notablemente la velocidad de los desplazamientos, un ejemplo es el AVE de Renfe que llega a alcanzar velocidades de 300 Km/h. No obstante, este aumento de la velocidad, aumenta el riesgo de accidentes. Un ejemplo del riesgo que conllevan estos vehículos, es el accidente ocurrido en Santiago de Compostela, que ocurrió debido al exceso de velocidad, y que ocasionó víctimas mortales. Por este riesgo de accidentes, la seguridad de los pasajeros es un factor importante en el mundo ferroviario. Sin embargo, no sólo es importante la seguridad de los pasajeros, también su confort. Las vibraciones del vehículo, así como aceleraciones del vehículo, influyen en este confort. Este proyecto, se centra en el confort de los pasajeros.

La Ciencia e Ingeniería de los Materiales se desarrolla con los años, permitiendo la utilización de nuevos materiales mucho más eficientes. En este Proyecto, se estudian los materiales magnetoreológicos, que son utilizados en el campo del transporte, no sólo para amortiguadores también son implementados en otros elementos de los vehículos como los frenos.

Para estudiar el confort de los pasajeros se desarrolla un modelo de amortiguador magnetoreológico mediante el programa Simulink. Éste modelo se implementa en dos modelos de tren diferentes, con dos programas distintos (uno se desarrolla con Simpack y el otro en Simulink), y se hacen diferentes simulaciones para estudiar distintos parámetros, cómo son la aceleración y desplazamiento vertical del vagón.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del Proyecto es estudiar y desarrollar un sistema de suspensión semiactiva en ferrocarriles de tipo magnetoreológico. Para llevarlo a cabo, se deben realizar los siguientes subobjetivos:

- Modelado mediante Simulink del modelo de amortiguador utilizando las ecuaciones correspondientes al modelo de Bouc-Wen mejorado.
- Creación de un modelo de vehículo ferroviario de 9 grados de libertad en Simulink que permite implementar, fácilmente el modelo desarrollado del amortiguador.
- Modelado de un vehículo ferroviario mediante el programa Simpack, en el que se incluyen las partes del bogie necesarias con sus correspondientes sistemas de referencia.
- Creación de la red neuronal necesaria para poder implementar el modelo de amortiguador en Simpack, y posterior creación de los sensores y elementos de control que permiten conectar el prototipo con el modelado en Simulink del amortiguador.
- Una vez llevados a cabo ambos modelos, se realizan diferentes simulaciones, sobre varios parámetros del vehículo.

1.3. Fases del desarrollo

Hay que tener en cuenta que las fases que se siguen en un Proyecto son las siguientes:

- La primera fase es la de estudios previos, en la cual se define el problema, se buscan soluciones y se estudia la tecnología existente.
- La segunda fase, de diseño y simulación por ordenador donde, partiendo de ideas de la primera fase se desarrollan modelos con programas de ordenador, y se realizan simulaciones con posibles correcciones sobre el programa.
- La tercera y última fase es la de construcción y ensayo real, dónde se construye un prototipo real y se comprueban todos los resultados obtenidos anteriormente.

De las anteriores tres fases en Trabajo únicamente se estudian las dos primeras, se pone en contexto sobre la tecnología existente, y se desarrollan modelos con los que se realizan simulaciones. En estas dos fases se pueden distinguir las siguientes etapas:

- Documentación. En esta etapa se plantea el problema a resolver, y se estudia el estado del arte.
- Desarrollo del modelo de amortiguador. Con las ecuaciones del modelo a utilizar, se programa el modelo que, más tarde, se implementa en los dos modelos de tren.
- Desarrollo del modelo de 9 grados de libertad. Al igual que con el amortiguador, se utiliza el entorno Simulink para llevar a cabo este modelo.
- Desarrollo del modelo en Simpack. Primero se aprende a usar el programa y, más tarde, se modela un modelo de tren con el que se realizarán simulaciones
- Realización de la red neuronal. Con esta red se puede implementar el modelo de amortiguador en el programa Simpack.
- Simulaciones. Éstas se llevan a cabo para comprobar el funcionamiento de los amortiguadores y el comportamiento del tren bajo perturbaciones en la vía.

1.4. Estructura del documento

El documento está estructurado por una serie de capítulos, los cuales están citados y explicados brevemente a continuación:

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos.**
Este primer capítulo recoge una breve introducción al Proyecto, así como los objetivos y fases marcados para desarrollarlo, y una reseña del desglose del contenido de cada capítulo.
- **Capítulo 2. Estado del arte.**
En este capítulo se recoge el estado del arte, mostrando diferentes apartados sobre la historia de los elementos de un tren, así como varios apartados sobre la suspensión desde sus elementos hasta los diferentes tipos de suspensión que existen.
- **Capítulo 3. Reología.**
Recoge toda la información sobre los fluidos magnetoreológicos, desde sus componentes, propiedades, su funcionamiento, etc. Es importante destacar que se incluye el apartado sobre los amortiguadores magnetoreológico
- **Capítulo 4. Modelado del amortiguador magnetoreológico en Simulink.**
En este capítulo se recogen las ecuaciones que se utilizarán para el modelo de amortiguador, en este caso las del modelo de Bouc-Wen mejorado. Además también se incluye todo el modelo desarrollado con la herramienta Simulink de MATLAB.
- **Capítulo 5. Modelo de vehículo de 9 GDL.**
Se incluyen tres apartados en este capítulo, comenzando por las ecuaciones que se utilizarán para el modelo de tren, así como parte de su desarrollo en Simulink. En el tercer apartado se utilizan diferentes simulaciones, y se obtienen algunas conclusiones sobre los resultados.
- **Capítulo 6. Modelado de un tren en Simpack.**
Se incluye una breve descripción del programa Simpack, así como un desglose de las partes del tren desarrollado en Simpack, no está incluido en su totalidad el tren, ya que para facilitar su lectura, las distintas propiedades se han incluido en el Anexo A.
- **Capítulo 7. Redes Neuronales.**
Incluye una breve explicación sobre las redes neuronales, además de todo el desarrollo llevado a cabo, para obtener la red neuronal que se utiliza para poder implementar el modelo de amortiguador desarrollado en el capítulo 4, en el vehículo ferroviario de Simpack del capítulo 6.

- Capítulo 8. Estudios y resultados.
En este capítulo se explica la forma en que se han unido la red neuronal y el tren de Simpack, además de diferentes estudios llevados a cabo, y las conclusiones sacadas de estos resultados.
- Capítulo 9. Conclusiones y trabajos futuros.
Las conclusiones finales están recogidas en este capítulo, así como futuros trabajos propuestos basados en las necesidades que faltarían por cubrir en este Proyecto.
- Capítulo 10. Planificación y Presupuesto.
Una reseña sobre la planificación, y el pertinente presupuesto sobre el Proyecto están recogidos en este capítulo final.
- Anexos.
Se recogen dos Anexos en este trabajo, el Anexo A es sobre la construcción y datos necesarios para realizar el tren de Simpack, y el Anexo B que recoge todas las ecuaciones del modelo de 9 grados de libertad y también los datos del tren para realizar el modelo en Simulink.

CAPÍTULO 2: Estado del arte

2.1. Historia de los ferrocarriles. Trenes en España

La importancia del transporte de viajeros y mercancías ha dado lugar a una extensa historia referente al mundo de los ferrocarriles. No obstante en este apartado únicamente se recoge una breve reseña histórica, tanto mundial como específica para España, que sirva para entender la importancia de este Proyecto.

2.1.1. Historia de los ferrocarriles

Aunque actualmente la tracción utilizada es la eléctrica y la diesel en menor medida, cabe destacar que los comienzos del ferrocarril están basados en la tracción de vapor, la cual se sigue utilizando en algunos países como África, Asia y Sudamérica [1].

El transporte mediante guiado comenzó en la antigüedad, cuando los hombres comprendieron que tras el paso de los carros se producía una rodada profunda que ayudaba a mantener los vehículos en el camino [1].

El transporte guiado por carriles se remonta a épocas muy antiguas. Los egipcios ya utilizaban carriles de piedra, y también hay evidencias de que los romanos las utilizaban ya que se han encontrado restos de carriles en las ruinas de Pompeya y Templo de Ceres. Este guiado evolucionó hasta tener unos carriles y una rueda con pestaña hacia el siglo XVI [2].

Sin embargo hacia el año 1800, tras la invención de la locomotora, fue cuando se conoció por primera vez un ferrocarril como tal. Para llegar a ese punto tuvo que extenderse el uso de carriles hacia el siglo XVI por la minería inglesa y el perfeccionamiento de estos con el uso de carriles forrados de hierro y ruedas con llantas y cerco metálico en el XVIII [2].

Concretando, no fue hasta el año 1803 que se reconoce la aparición del ferrocarril tal y como se entiende hoy, en este año un ingeniero inglés llamado Richard Trevithick, y su compañero Andrew Vivian patentaron una locomotora a vapor que se desplazaba sobre raíles [1].

La llamada Era del Ferrocarril comienza con la inauguración de la línea Liverpool-Manchester con la locomotora Rocket de Stephenson el 15 de septiembre de 1825 [2]. Esta locomotora se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Locomotora "Rocket" [4]

Más tarde, en 1879, se lleva a cabo en Berlín la demostración de una primera locomotora eléctrica desarrollada por Werner von Siemens. En 1892 se construye la primera locomotora con motor de explosión, y en 1912, se construye en Alemania la primera locomotora diesel [1].

A lo largo de la historia el desarrollo de los ferrocarriles sigue creciendo. Se puede ver a continuación en el siguiente apartado Ferrocarriles en España.

2.1.2. Ferrocarriles en España

Aunque en el siglo XIX en Europa aparecían líneas de ferrocarriles, pieza importante de la revolución industrial, al principio España no estaba preparada y hubo retrasos en su implantación debido a la orografía, falta de recursos económicos y el atraso económico en general [3].

El primer ferrocarril español vio la luz fuera de la Península en Cuba en el año 1837. Unos años más tarde tuvo lugar el siguiente hito en la historia ferroviaria española, se estableció el ancho de vía innovador de seis pies castellanos, es decir, 1.668 mm, medida diferente a la del resto del mundo de 1.435 mm y propuesto por los ingenieros Subercase y Santa Cruz [3].

En la Península el primer ferrocarril inaugurado en 1848 unía Barcelona con Mataró. En 1851 se realizó el tramo Madrid Aranjuez, así la vía ferroviaria fue extendiéndose y, para el año 1855, ya se habían construido 400 kilómetros de vía férrea.

Fue en el año 1856 cuando se creó la Compañía de ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA), en 1858 la Compañía de los Ferrocarriles del Norte, y en 1877 los Ferrocarriles Andaluces y ya en 1880 se creó el Ferrocarril de Madrid a Cáceres y Portugal, inaugurándose en 1881 la línea Madrid - Lisboa.

El ritmo de construcción es alto, contando con 15.000 Km de línea ferroviaria a comienzos del siglo XX, más de 10.000 en ancho ibérico y el resto en vía estrecha. Después de ese

momento, el crecimiento se ralentizó, y surgieron dificultades económicas debidas a la crisis de los años 30 y a la guerra civil, estas dificultades provocarían la ruina de las compañías.

Ya en 1941, como consecuencia de la imposibilidad de mantener el transporte por parte de las compañías privadas, se hace necesaria la intervención estatal en las grandes compañías ferroviarias de vía ancha, naciendo de este modo la Red Nacional de Ferrocarriles Españoles, llamada RENFE. Esta empresa pública monopolizó el transporte ferroviario, se pusieron 12.401Km bajo su control y sus objetivos prioritarios fueron la reconstrucción de infraestructuras dañadas en la contienda y establecer para la nueva organización un modelo de gestión. Como consecuencia del auge de otros medios de transporte(coche, avión), el tren perdió protagonismo, lo que aumentó el déficit [3].

En la década de los 80, se decidió dar un impulso al ferrocarril, y en 1981 se aprobó un plan (Plan de Transportes Ferroviarios), que realiza grandes inversiones, para mejorar el servicio de cercanías o líneas de Alta Velocidad. Hoy día la modernización sigue siendo prioritaria.

2.2 Elementos de un tren

Se conoce como material rodante a todos los tipos de vehículos dotados con ruedas que son capaces de circular sobre una vía férrea, cuyo objetivo principal es el transporte de diferentes tipos de cargas. Se pueden clasificar de varias formas, pero los dos grandes grupos son: Material motor y material remolcado. El *material motor* está provisto de un motor para su autopropulsión y/o tracción del material rodante, y el *material remolcado* es el que necesita ser enganchado al material motor para su desplazamiento [5].

Se puede definir un tren como el conjunto constituido por uno o varios vehículos remolcados por uno o más elementos tractores [6].

En este apartado se describen las partes más importantes de un vehículo ferroviario, por lo tanto no se describe el vehículo ferroviario en su totalidad si no sus partes imprescindibles para el entendimiento de este Proyecto, en la Figura 2.2. puede verse un esquema de algunas de las partes.

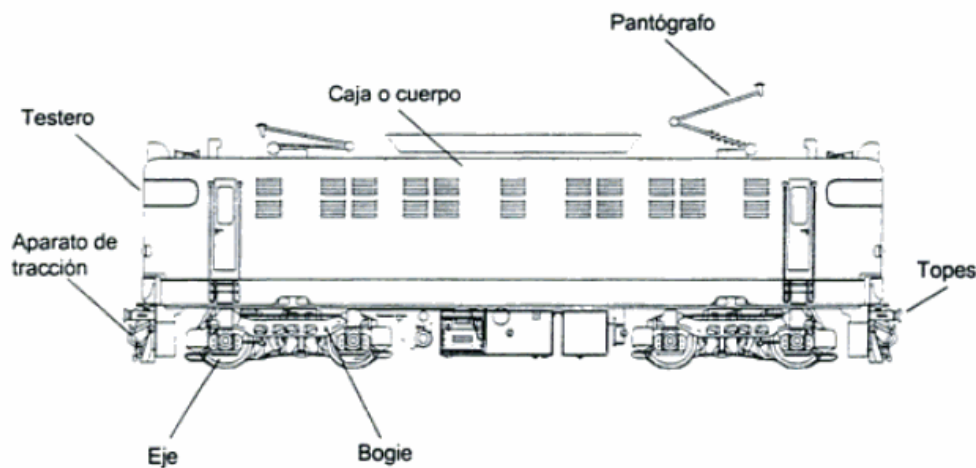


Figura 2.2. Vehículo ferroviario

- **Caja:** en cuyo interior se sitúan los viajeros, mercancía, etc. dependiendo del tipo del vehículo. Es solidaria al bastidor [5].
- **Caja de grasa:** son unos recipientes metálicos que contienen lubricantes y llevan encajado un rodamiento en el apoyo de las cargas sobre los ejes. Permiten el enlace entre el eje y la suspensión, transmitiendo todos los esfuerzos (longitudinales, laterales y transversales), y permite el giro del eje. Estas cajas contienen rodamientos de bolas, de rodillos cilíndricos o cónicos [6][7]. Puede verse en la Figura 2.3. la situación de la caja de grasa.

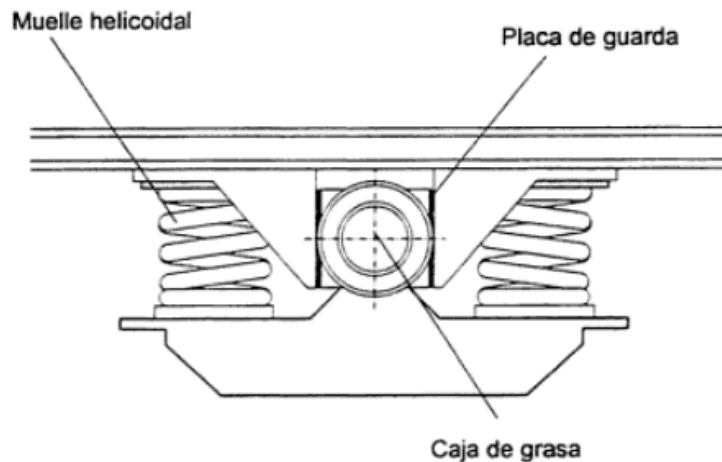


Figura 2.3. Caja de grasa con suspensión primaria de muelles helicoidales

La envoltura exterior o caja, se fabrica de hierro estampado o acero moldeado y de una sola pieza, aunque también existen cajas de grasa en dos piezas, asegurando ambas partes por medio de un estribo o pasadores de sujeción, teniendo la ventaja de un fácil desmontaje para examinar el cojinete. La forma exterior de la caja depende además del tipo fijación empleado, siendo por tanto función del tipo de suspensión del vehículo. Cabe indicar que las placas de guarda son piezas con forma de horquilla, y están diseñadas para mantener las cajas de grasa en su posición normal [5][6]. En la Figura 2.4. un esquema de las partes de la caja de grasa.

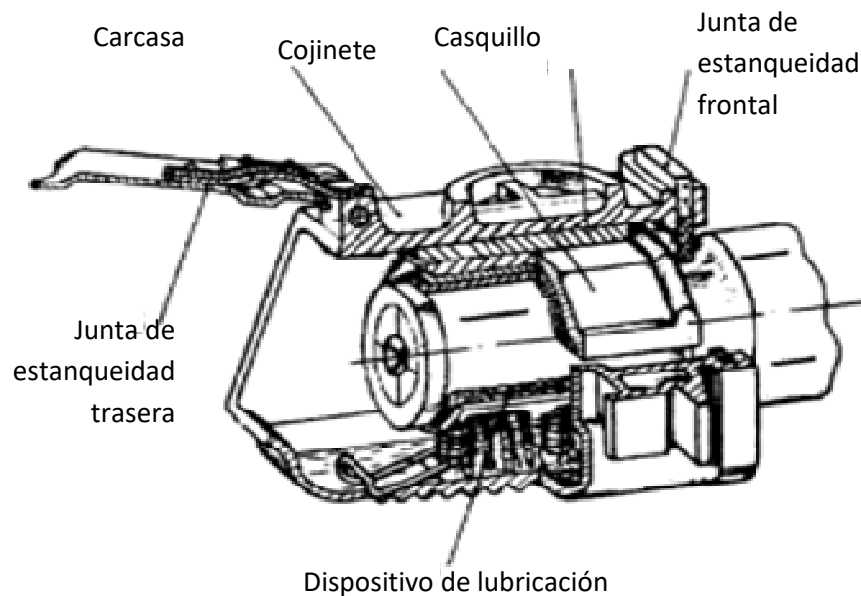


Figura 2.4. Caja de grasa

- **Ruedas:** elementos en forma circular que giran en su eje, cuya superficie de contacto tiene forma troncocónica, su función es el movimiento y guiado del vehículo, se construyen de una sola pieza (monoblock)[5]. Suelen tener diámetros comprendidos entre 600 y 900 mm dependiendo del servicio que vayan a prestar, menor diámetro

para servicios tranviarios y mayor diámetro para uso metropolitano. Se fabrican de una sola pieza en acero moldeado o fundición especial, llamadas comúnmente ruedas enterizas o monobloque [8]. La representación de estas ruedas puede verse en la Figura 2.5. Hay 3 zonas diferenciadas en una rueda [5]:

- *Llanta*: es la superficie de rodadura con forma concreta, el perfil. Este perfil es ligeramente cónico y su función es el guiado [5]. Al ser la superficie que entra en contacto con el carril, proporciona la superficie de rodadura de la rueda-carril, por lo que está sometida al desgaste y choque deteriorándose por lo que necesita ser mecanizada o reemplazada
- *Cubo*: parte central que se cala en la mangueta del eje.
- *Velo*: zona donde se unen llanta y cubo.

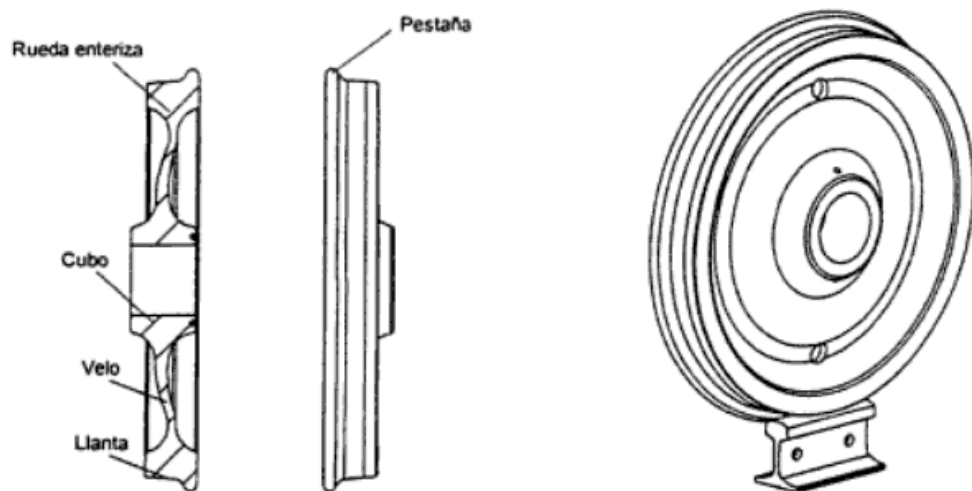


Figura 2.5. Esquema de una rueda ferroviaria

- **Ejes:** el conjunto de ruedas montadas en ejes es de especial importancia. Un eje está dividido en las siguientes partes principales:
 - *Fuste o cuerpo*: se encuentra entre las dos ruedas.
 - *Secciones de calaje*: sobre ellas se calan o calzan las ruedas.
 - *Manguetas*: en ellas reposan los cojinetes de las cajas de grasa, que a su vez soportan el peso suspendido del vehículo.

Las dimensiones de un eje en las diferentes secciones dependen de la carga a la que se somete. El material está sometido a una gran fatiga, por el esfuerzo cortante del calaje de la rueda, así como por la alternancia de las flexiones en la sección de empotramiento de la mangueta.

Cabe destacar que el conjunto de dos ruedas caladas más el eje se denomina *Eje montado*. En este montaje es importante que el centro de gravedad coincida con el teórico para ya que sino el eje se albearía debido a la resultante del esfuerzo de tracción, sobretodo en caso de eje motor [8]. En la Figura 2.6. se ve el esquema final de un eje montado.

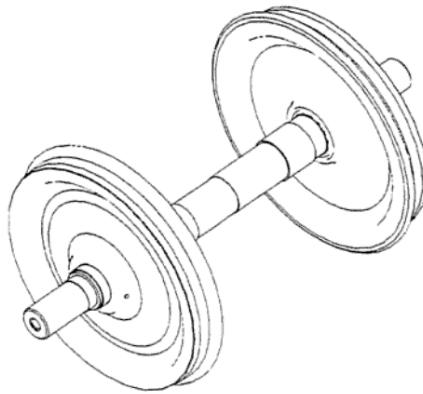


Figura 2.6. Eje montado

- **Bogie:** es la estructura sobre la que descansan los vagones, coches y locomotoras que no utilizan ejes simples. Usualmente se colocan dos bogies en cada coche. Tienen las siguientes funciones principales:
 - Soportar la carrocería.
 - Dar estabilidad al vehículo en rectas y en curvas.
 - Garantizar el confort de marcha mediante absorción de vibraciones y minimizar fuerzas centrífugas en curvas a alta velocidad.
 - Minimizar la generación de irregularidades y abrasión en la vía.

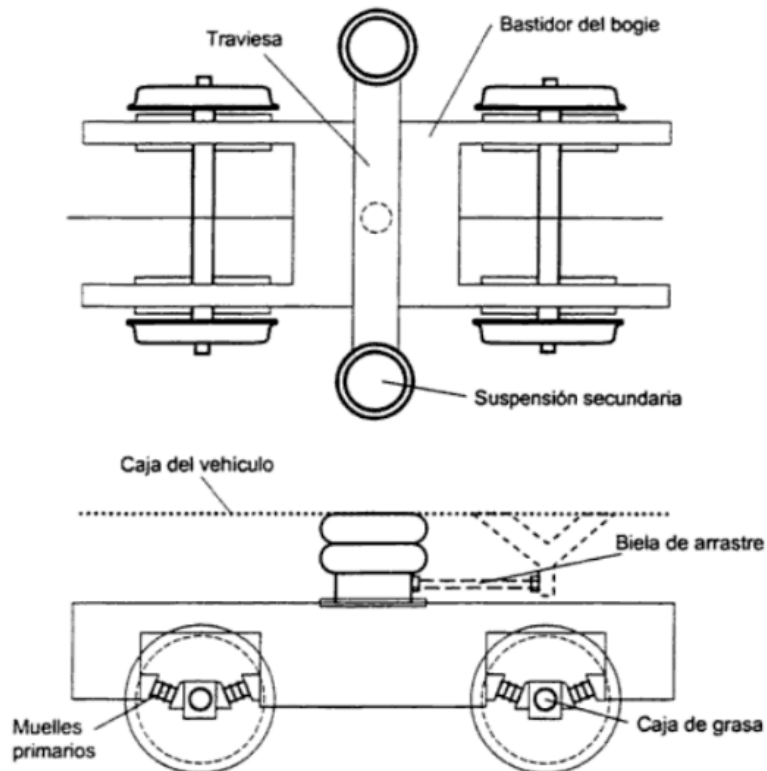


Figura 2.7. Bogie de vehículo de pasajeros

Existen dos grandes tipos de bogies, el remolcado y el motor. El bogie motor es el que tiene tracción, por lo que incorpora motores y mecanismos capaces de producir esfuerzos de tracción, así como los de frenado, siendo ambos esfuerzos aplicados a la vía a través de los ejes montados y transmitidos a la caja por medio del sistema articulado de barras de tracción. Los bogies remolques no portan ni el motor ni la reductora, tienen diseño más simple [8]. Un pequeño esquema de un bogie puede verse en la Figura 2.7.

El empleo de bogies viene de querer compatibilizar la distribución del peso del vehículo en más de dos ejes, en el paso del vehículo en curvas sin que se generen esfuerzos masivos. Si se usaran distancias iguales entre ejes (equidistantes) en el vehículo, se necesitaría un desplazamiento lateral relativo entre los ejes, además de un vehículo elevado, lo que conlleva construcciones complejas, esfuerzos rueda-carril elevados, lo que conllevaría riesgo de descarrilar. El montaje de los ejes en los bogies resuelve este problema, y da lugar a pequeños ángulos de ataque rueda-vía, no hay unión directa entre ejes y vehículos, por lo que no se generan esfuerzos por desplazamientos relativos entre ellos [8].

Los componentes más importantes de un bogie motor son:

- **El bastidor:** se denomina bastidor a la estructura metálica o armazón que conforma el conjunto del bogie, y sirve para la fijación de ejes, ruedas, etc. Es una estructura metálica normalmente de acero soldado, con unos requerimientos exigentes, y un proceso de fabricación rigurosos, tal y como se ve en la Figura 2.8.

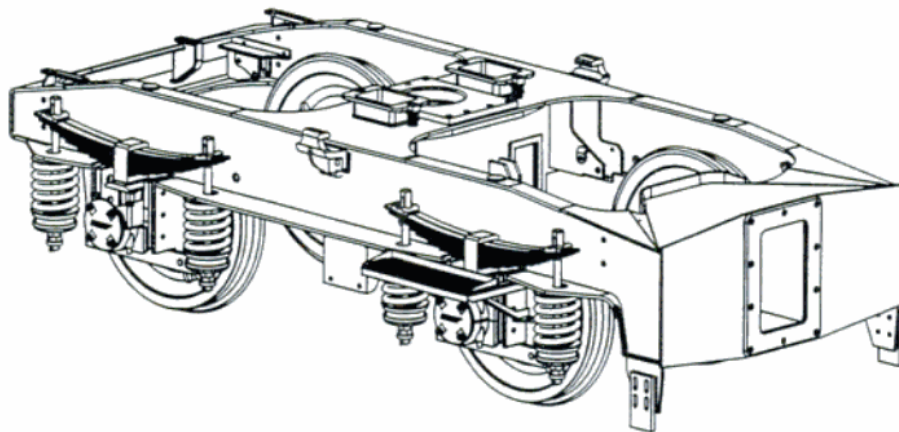


Figura 2.8. Bastidor de un bogie en chapa soldada

Se diseñan como conjuntos solicitados a esfuerzos en las tres direcciones, y con criterios de alta exigencia a posibles deterioros y roturas por fatiga. Se recomienda que una serie de fabricación de bogie, una de las primeras unidades se someta a ensayos cíclicos de rotura en los tres ejes, y posteriormente sea inspeccionado utilizando radiografías, ultrasonidos, etc.

Las solicitaciones a las que se somete el bastidor aconsejan que su mantenimiento en el tiempo sea mínimo o nulo, y se reduce a operaciones de limpieza y repintado si no hay problemas, no obstante se debe evitar cualquier daño en los mismos que origine una grieta por fatiga (golpeo de partes mecánicas, daños en soldaduras, etc.) [1].

- **Ejes y ruedas:** la idea del eje de ferrocarril con dos ruedas cónicas unidas por un eje, tiene como finalidad la de compensar naturalmente la diferencia de camino recorrido entre los carriles exterior e interior en una curva en la que no haya deslizamiento, además favorece el autocentrado del eje sobre la vía [1].
- **Los reductores:** engranajes que permiten variar el par motor y alcanzar la alta velocidad a la que giran los motores de tracción, con curvas de características en servicio continuo de hasta 5000 rpm, gracias a estos reductores existe la interconexión entre motor y eje. Estos sistemas se diferencian entre sí por sus distintas etapas de desmultiplicación (2, 4 y 6), y por el sistema de apoyo en el eje y transmisión [1] [8]. Estos reductores están sometidos a grandes esfuerzos mecánicos (tienen que transmitir todo el esfuerzo de tracción y freno), por lo que su diseño es extremadamente crítico [1].
- **Frenos:** el funcionamiento se basa en la combinación de un freno eléctrico (el motor de tracción retiene la inercia que lleva el tren funcionando como generador y devolviendo corriente a la catenaria a través del pantógrafo(es el elemento mediante el cual se logra corriente eléctrica mediante el contacto de las tiras de contacto del pantógrafo que deslizan a lo largo del hilo de contacto), y el freno neumático (basado en accionamiento por medios neumáticos). Luego este sistema de frenado que puede realizar una combinación de frenado eléctrico y neumático (blending) de tren o coche aprovechando el freno eléctrico y adaptándose a cualquier tipo de composición, lo que permite frenar eléctricamente los ejes motores hasta el máximo del freno eléctrico, después frenar los ejes remolques hasta igualar adherencia y finalmente frenar neumáticamente en ambos tipos de ejes hasta que se alcance la deceleración pedida. También permite frenar eléctricamente los motores y una vez agotado su freno eléctrico, aplicar de igual manera en los ejes motores como remolques un esfuerzo neumático de freno hasta alcanzar las prestaciones pedidas. Se utilizan principalmente tres tipos de frenos: de zapata que actúan sobre la rueda, de disco, y de patín electromagnético [8].
- **Elementos auxiliares:** como antenas, sistemas de medición de velocidad, cajas de grasa, etc. [8].
- **La suspensión:** instalada en el bogie para absorber choques entre bastidor y la carrocería. Se puede diferenciar entre suspensión primaria y secundaria que se explican en el siguiente apartado [8].

2.3 Sistema de suspensión en ferrocarriles

Entendiendo como suspensión el conjunto de dispositivos destinados a filtrar las vibraciones, transmitir esfuerzos y guiar las ruedas, se puede decir que una suspensión ferroviaria suele ser generalmente más simple que una automovilística, y no hay diferenciación entre la delantera y la trasera como en los automóviles, no obstante si se utilizan dos etapas de suspensión con soluciones diferentes para cada una (sólo algunos vagones de mercancías utilizan una única etapa). La diferencia fundamental entre las suspensiones se basa en la utilización de bogie o no, cuando se usa un bogie la suspensión se realiza normalmente en dos etapas (pudiendo ser más), conocidas como suspensión primaria y secundaria, la primaria entre los ejes y el bastidor del bogie, y la secundaria ente el bastidor del bogie y la caja [8].

En este apartado se ven primero algunos de los elementos suspensión más comunes, así como la distinción entre suspensión primaria y secundaria, y los diferentes tipos de suspensiones (activa, pasiva y semiactiva), partes importantes de este trabajo.

2.3.1 Elementos de suspensión

En este apartado se estudian de forma general los elementos encargados de la suspensión. Para ello, se estudian algunos elementos de forma breve, haciendo una diferenciación entre dos grupos: elementos elásticos y elementos amortiguadores:

A. Elementos elásticos

Son aquellos que garantizan la unión entre los órganos de rodadura y el vehículo, aportando una fuerza recuperada al producirse separación entre ellos [10].

1. Ballestas

Las ballestas están formadas por diferentes hojas o láminas de acero, como se puede ver en la Figura. 2.9, pueden tener forma tanto constante como variable (perfil parabólico o trapezoidal). Es un muelle tradicional y no solamente por su aplicaciones ferroviarias. La primera lámina, llamada hoja maestra, es la más larga termina de forma curvada para poder articularla, las demás láminas van disminuyendo su tamaño y curvándose, estas trabajan a flexión de forma conjunta, y pueden presentar un comportamiento lineal o no. Se presentan distintas configuraciones que pueden presentar tanto topes de desplazamiento como ballestines que incrementan la rigidez al llegarse a unos valores determinados de desplazamiento de carga. Tradicionalmente se ha aprovechado la fricción entre las hojas para dotar de amortiguamiento, debido a la complejidad, a lo impredecible que es y también a la dificultad de la regulación finalmente se ha optado por su combinación con amortiguadores hidráulicos [6][8].

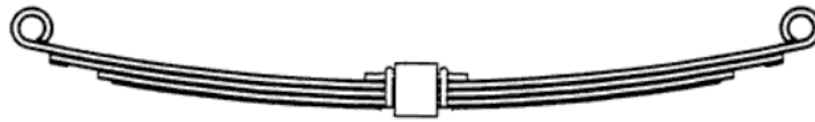


Figura 2.9. Ballesta

2. Resortes helicoidales

Un muelle helicoidal es un varilla que va formando una hélice, su paso y diámetro puede ser tanto constante como variable, y puede trabajar tanto a flexión como a compresión, puede verse la representación de algunos muelles en la Figura 2.10. Son utilizados a compresión por la propia limitación de la deflexión, aunque no presentan ningún tipo de amortiguamiento importante y por eso van siempre asociados a algún disipador externo. Son más compactos y de regulación más precisa que las ballestas [6]. Su rigidez tiene un carácter lineal, proporcional a la deflexión del muelle en dirección longitudinal, por lo cual su constante de rigidez, que depende del número de espiras, del diámetro, del diámetro del hilo y del material [8].

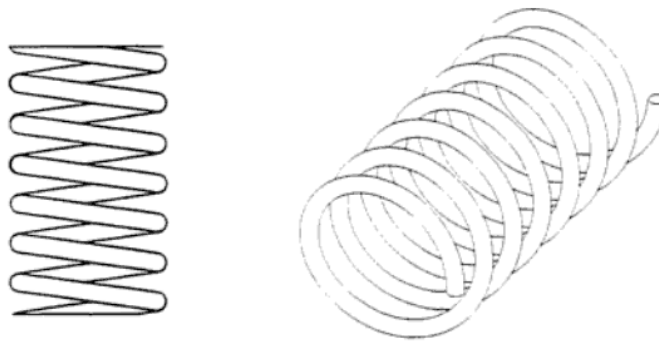


Figura 2.10. Muelle helicoidal

3. Barras de torsión

Es un muelle de alta rigidez, cuyo principio de funcionamiento es la torsión de una barra empotrada, como se ve en la Figura 2.11. La deflexión suele estar limitada para evitar sobrecargas.

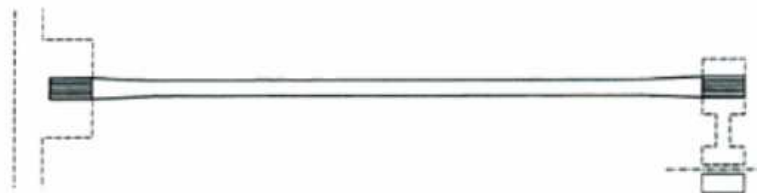


Figura 2.11. Barra de torsión

B. Elementos amortiguadores

Son disipadores de energía, hacen que decaiga el movimiento oscilatorio debido a cualquier tipo de perturbación actuante sobre la suspensión, algunos sistemas cumplen función de elásticos y de amortiguadores [10].

1. Amortiguadores de fricción

Se usan en suspensiones de vagones de mercancías. Tienen elementos de fricción, con los cuáles deriva parte de la carga vertical que los precomprimen. Si bien es cierto que presenta varias desventajas:

- Mientras no se supere la fuerza de fricción la suspensión está bloqueada por lo que el vehículo no dispone de suspensión.
- Cuando se supera la fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye en lugar de aumentar con la velocidad.
- Con el desgaste se altera su comportamiento, por lo que se necesita reponer piezas desgastadas [9].

2. Amortiguadores hidráulicos

En estos la fuerza amortiguadora es creciente con la velocidad. Tienen un pistón que trabaja dentro de un cilindro con aceite a ambos lados del pistón, es decir son de doble efecto. Existen diferentes tipos de amortiguadores hidráulicos, entre ellos están los bitubo presurizados o no presurizados, o los monotubo presurizados o no presurizados.

3. Amortiguadores magnetoreológicos

Este tipo de amortiguador está descrito en el apartado 3.2.

2.3.2 Suspensión primaria y secundaria

Ya se ha comentado, que usualmente en ferrocarriles la suspensión se divide en dos etapas, la primaria y la secundaria. Fijándonos en la Figura 2.12. podemos ver dónde se sitúan cada una de ellas.

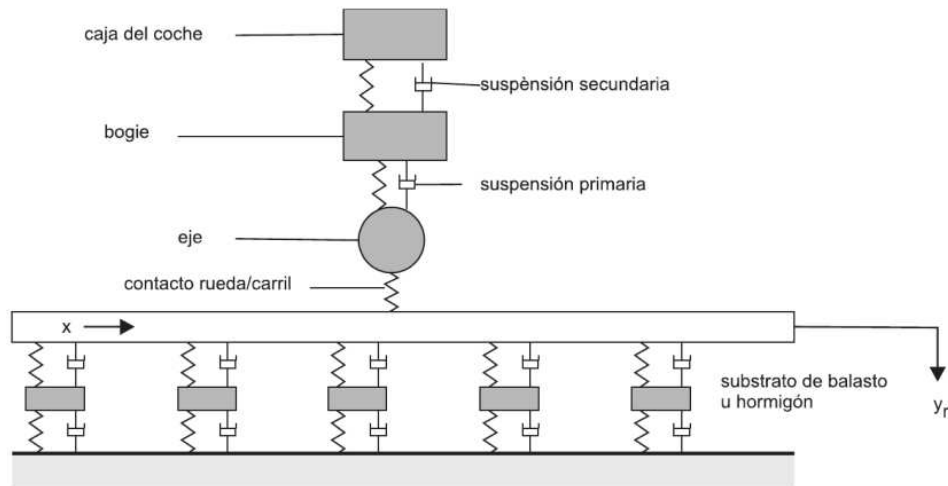


Figura 2.12. Esquema suspensión primaria y secundaria

Ahora se estudia cada una de ellas por separado:

A. Primaria

La suspensión primaria se intercala entre el conjunto de ejes y ruedas y el bastidor del bogie. Tiene dos funciones:

1. Reduce el nivel de vibraciones que soporta el bastidor y los elementos montados en él.
2. Asegura el reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, lo cual ayuda a las prestaciones de frenado y tracción y evitar descarrilamientos.

Los elementos de la suspensión primaria, aseguran la suspensión vertical, pero también se relacionan con el guiado de los ejes en direcciones longitudinales y laterales. Las rigideces del guiado son fundamentales para definir la estabilidad dinámica del vehículo y los esfuerzos rueda carril al paso por curva [8]. Cuando aumentan las sollicitaciones dinámicas y velocidades, las suspensiones primarias aumentan su complejidad, pasando de montajes simples, a montajes complejos y avanzados [1]. En la Figura 2.13. puede verse el efecto de la suspensión primaria en el guiado de la rueda al paso por curva:

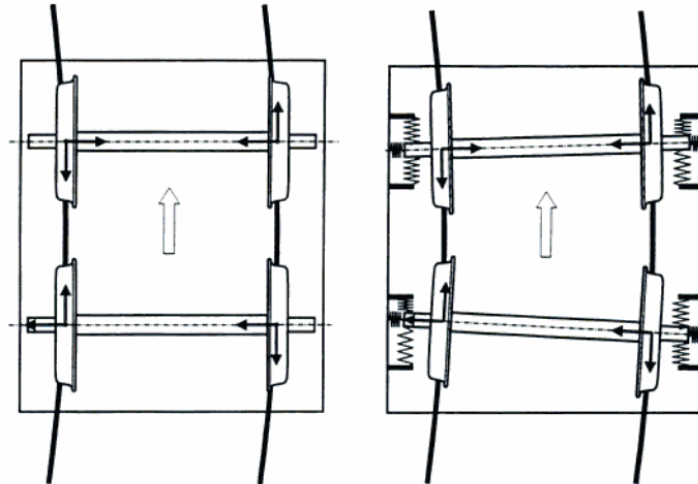


Figura 2.13. Efecto de la suspensión primaria en el guiado de la rueda

Hoy día en las suspensiones primarias es crucial el ciclo de histéresis del conjunto y la fatiga del elemento elástico, que va provocando con el tiempo bajada o reducción de su altura, lo que conlleva el recalce o incorporación de goma en la campana de soporte. Todo esto implica una revisión de mediciones periódicas de esta altura [1].

Esta suspensión primaria tiene diferentes soluciones, pero su diseño trata de resolver problemas de disponibilidad de espacio, peso, precio y mantenimiento. Pueden realizarse mediante resortes de caucho o goma, que a su vez existen con caucho y acero, o únicamente caucho, o también mediante muelles acompañados de sus amortiguadores correspondientes [1][8].

Existen diferentes soluciones de suspensión primaria, van desde amortiguamientos por fricción en vagones de mercancías, a diseños más complejos que tratan de reducir el espacio coste y mantenimiento [6].

Entre estas soluciones constructivas para asegurar el apoyo vertical destacan las siguientes:

- Apoyo con elemento elástico en cada rueda: uno o dos elementos elásticos enlazan cada caja de grasa con el bastidor del bogie, como se ve en la Figura 2.14.

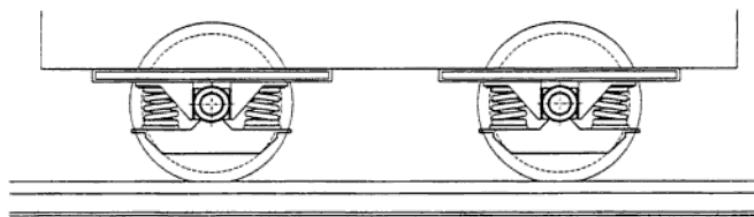


Figura 2.14. Apoyo vertical con elementos elásticos independientes

- Apoyo por elementos elásticos conjugados: en algunas ocasiones debido a la forma de la unión bogie-caja del vehículo, se debe utilizar esta solución para evitar diferencias entre ambos ejes del bogie. Estos elementos elásticos pueden ver la Figura 2.15.

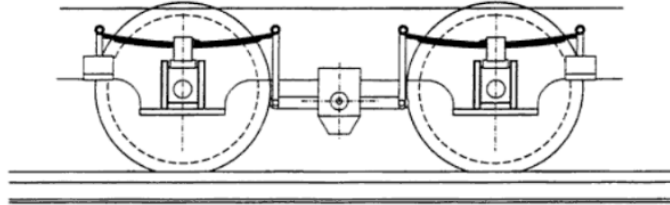


Figura 2.15 Apoyo vertical por elementos elásticos conjugados y ecualización de fuerzas entre dos ejes con suspensión de ballesta

- Apoyo por balancín entre cajas: se unen las caja de grasa por un balancín no suspendido, poniendo los elementos elásticos entre éste y el bastidor del bogie. Esta disposición puede verse en la Figura 2.16.

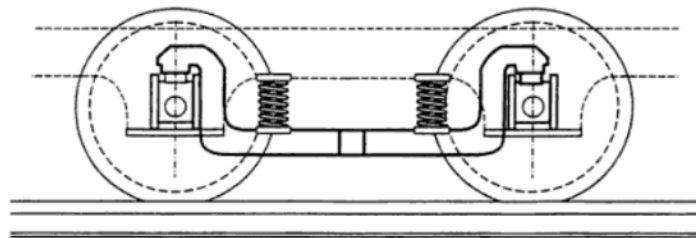


Figura 2.16. Disposición de un bogie de cuatro ruedas con "semieculización" de la carga y apoyo vertical por balancín entre cajas

Estas son sólo algunas disposiciones para asegurar el apoyo vertical, pero también se debe asegurar el guiado longitudinal. Entre ellas las soluciones constructivas para este guiado están las siguientes:

- Por brazo longitudinal: Un brazo longitudinal articulado con el bastidor del bogie por medio de un elemento elástico de caucho. Este brazo se puede ver en la Figura 2.17.

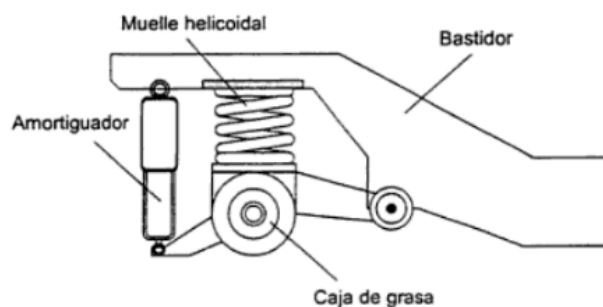


Figura 2.17. Suspensión primaria de brazo articulado longitudinal

- Por bieleta única: cuando se dispone de un balancín que enlaza las dos cajas de grasa, con una sola bieleta se asegura el arrastre longitudinal. Esta disposición se ve en la Figura 2.18.

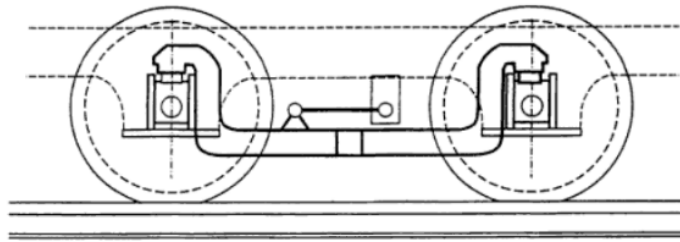


Figura 2.18. Arrastre por bieleta única

Para asegurar el guiado transversal se utilizan soluciones como resbaladeras planas o cilíndricas.

B. Secundaria

La suspensión secundaria se ubica entre la caja del coche y el bastidor del bogie. Su misión es la de filtrar las vibraciones en dirección tanto lateral como vertical, por este motivo la suspensión secundaria tiene una alta flexibilidad en estas dos direcciones [8].

Usualmente se utilizan suspensiones con una frecuencia natural cercana a la del ser humano. Para la suspensión vertical 1 Hz y para la lateral 0.7 Hz.

Estas suspensiones pueden ser también de muelles, gomas o balones llenos de aire comprimido.

Al igual que en la suspensión primaria existen diferentes configuraciones para conseguir el apoyo vertical entre la caja y el bogie, algunas de ellas son las siguientes:

- Pivote central: se usa un pivote central unido a la caja de cabeza esférica y una quicionera esférica en el bogie. Este pivote puede verse en la Figura 2.19. Se trata de un apoyo sin efecto antigalope, y se utilizan unos equilibradores laterales elásticos que permiten girar el bogie controlando el balanceo de la caja. A veces se utilizan los equilibradores, montándolos sobre unas resbaladeras, para frenar el giro del bogie, consiguiendo efecto antilazo.

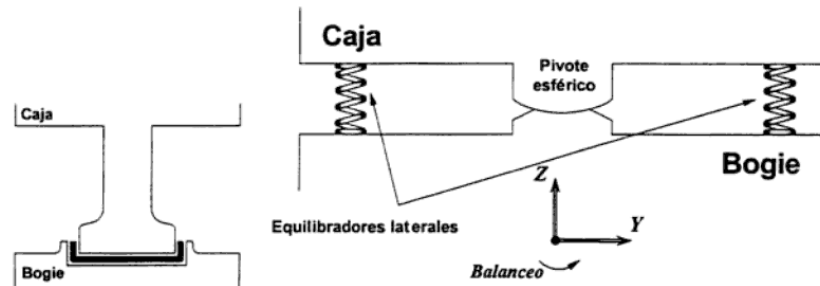


Figura 2.19. Soporte vertical por pivote central cilíndrico o esférico

- Apoyo en dos puntos, barras de tracción etc.

Sin embargo para conseguir el guiado transversal pueden utilizarse otras soluciones, como, por ejemplo las siguientes:

- Pivote central desplazable + resortes: se utiliza cuando se tiene un apoyo vertical en un punto central para evitar el guiado lateral de forma rígida. La cantonera puede desplazarse lateralmente limitando el movimiento mediante elementos elásticos.
- Caja colgada del bogie por bieletas, traviesa sobre resbaladeras, traviesa oscilante, etc.

También se pueden encontrar suspensiones secundarias en las que el elemento elástico es un muelle de tipo neumático, o también un elemento de caucho en su lugar. También son posibles, configuraciones con resortes helicoidales que dan rigidez vertical y transversal completando con amortiguadores verticales y transversales y de un sistema de arrastre

2.3.3 Tipos de suspensión

Existen diferentes sistemas de suspensión, y se pueden clasificar de acuerdo al tipo de control que se ejerce en sus parámetros. Atendiendo a esto, existen 3 tipos de suspensiones diferentes:

- **Suspensión Pasiva:** tiene parámetros predeterminados y no es regulable automáticamente.
- **Suspensión Activa:** utiliza un actuador que incorpora energía para modificar la respuesta ante distintas perturbaciones en el terreno.
- **Suspensión Semiactiva:** regula la rigidez y/o el coeficiente de amortiguamiento sin ingresar energía al sistema.

Para determinar el rendimiento de una suspensión se consideran varios criterios como son la aceleración o desplazamiento vertical de la masa suspendida para evaluar el confort. El grado de sensibilidad a la frecuencia del cuerpo humano es variable y debe ser tenido en cuenta en la determinación del confort. Un sistema de suspensión ideal debe minimizar la respuesta a frecuencias en un rango de 0.2 a 10 Hz, para evitar mareos y movimientos de cabeza.

A continuación se explican de forma general estos 3 tipos de sistemas [11].

- Pasiva

Estos sistemas se caracterizan por no recibir directamente aplicación alguna de energía externa. Almacenan la energía y la disipan mediante resortes y amortiguadores como son por ejemplo los elementos estudiados en el apartado 2.3.1. Los parámetros de esta suspensión son fijos y se comprometen con las características del terreno, carga y confort.

En la Figura 2.20. se encuentran los siguientes elementos:

M_2 es la masa suspendida (chasis)

M_1 es la masa no suspendida (neumático)

K_2 es la rigidez de la suspensión

K_1 es la rigidez del neumático

B_2 es el coeficiente de amortiguamiento de la suspensión

B_1 es el coeficiente de amortiguamiento del neumático

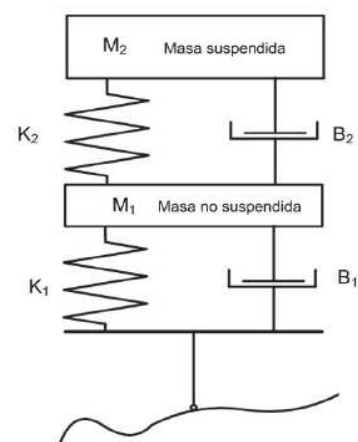


Figura 2.20. Suspensión pasiva

- **Activa**

Este tipo de suspensión activa almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionamiento es regulado a través de sensores y controladores, como se puede ver en la Figura 2.17. Para ejercer la fuerza de control se pueden utilizar diferentes clases de actuadores, como pueden ser los electrohidráulicos, neumáticos y electromagnéticos [11]. El esquema de la suspensión activa, está en la Figura 2.21.

Los sensores se usan para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones y así definir la respuesta de acuerdo al objetivo de control. Un sistema de suspensión activa usualmente utiliza acelerómetros en las esquinas del chasis y en las ruedas, cuya integración proporciona las respectivas velocidades, así como transductores lineales situados entre la rueda y el chasis para medir el desplazamiento relativo [11].

Un ordenador recoge los datos de estos sensores distribuidos estratégicamente para poder enviar las señales adecuadas a los actuadores y que estos operen para mantener la estabilidad. Un buen sistema debe tener un corto tiempo de respuesta para reaccionar rápido ante irregularidades de la vía. Por seguridad todo sistema de suspensión activa debe tener asociado uno pasivo, que estará presente en caso de fallo del sistema control o fallo de los actuadores [10].

La principal ventaja frente al sistema pasivo es que permite un control independiente de los elementos de suspensión ubicados en diferentes puntos del vehículo. Con este control se consiguen mejoras en confort, seguridad y estabilidad dinámica, ya que hay una reducción en los esfuerzos rueda-carril, vibraciones y el centrado de la carrocería al paso por curva. La principal desventaja es su elevado coste, sobretodo en el control de altas frecuencias, cuya implementación es cara [10].

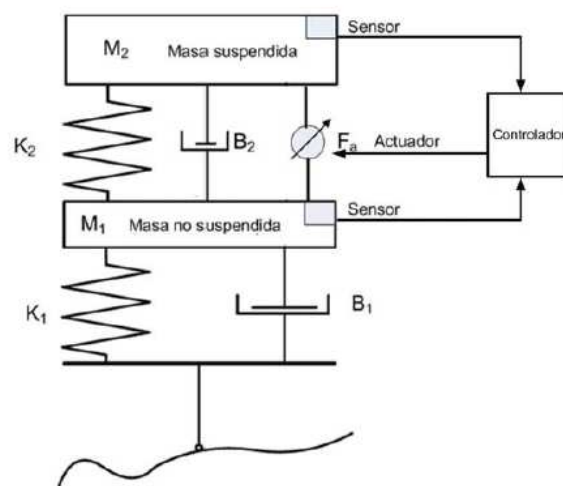


Figura 2.21. Suspensión activa

- Semiactiva

La característica principal de esta suspensión es tener amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento se modifica por control externo. Usualmente estas suspensión controlan las frecuencias bajas con elementos activos y las altas con pasivos. El esquema de la suspensión semiactiva está en la Figura 2.22.

Los amortiguadores semiactivos más representativos son los amortiguadores magnetoreológicos, en los que su respuesta varía con el campo magnético aplicado, también los electroreológicos cuya respuesta varía con el campo eléctrico aplicado, los amortiguadores neumáticos que se usan en autobuses y camiones, los amortiguadores de fricción seca que son altamente no lineales y basados en la fricción entre superficies en contacto.

Su rendimiento en trenes es comparable al de una suspensión activa y permite controlar su movimiento lateral.

En la siguiente figura puede verse una suspensión semiactiva donde se distingue el controlador los sensores y el amortiguador semiactivo [11].

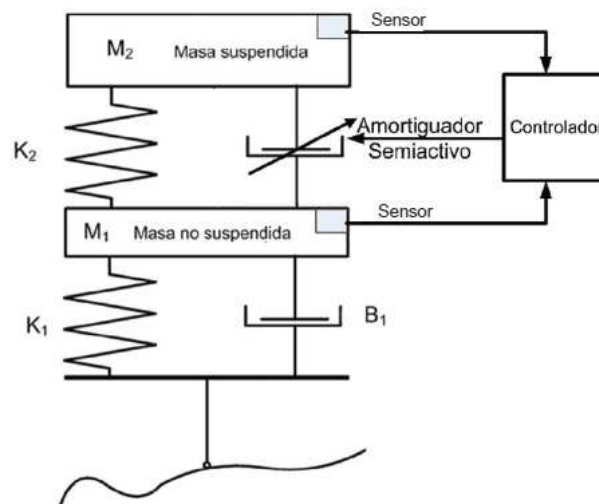


Figura 2.22. Suspensión semiactiva

CAPÍTULO 3: Reología

3.1 Fluidos magnetoreológicos

Un fluido magnetoreológico (Magneto rheological fluid o MRF) es un líquido inteligente, cuyas propiedades se pueden controlar mediante partículas de metal y un campo magnético. Estos tienen la capacidad de transmitir la fuerza de una manera controlada con ayuda de un campo magnético que mejora su rendimiento. Entre las aplicaciones tecnológicas que utilizan este tipo de fluidos están los amortiguadores, frenos, cojinetes, músculos artificiales neumáticos, etc. [13].

Los componentes básicos de la tecnología con estos fluidos, son un líquido MR y un campo magnético para controlar la viscosidad del fluido. El principio básico se basa en que pequeñas partículas se introducen en el líquido base, cuando se aplica un campo magnético al fluido, estas partículas forman una cadena alineada en la dirección del campo, que crea una resistencia al flujo del fluido [13]. Estas estructuras tipo cadena, restringen el movimiento del fluido dando lugar a un incremento en la viscosidad del fluido [12]. De esta manera, en presencia de un campo magnético el fluido se convierte en semisólido con un aumento en la resistencia a la fluencia, ocurriendo este fenómeno de manera rápida, tan sólo milisegundos, por lo que estos fluidos actúan de forma similar a los fluidos Bingham usados en ingeniería. En ausencia de este campo magnético estos fluidos tienen un comportamiento newtoniano.

En la Figura 3.1. pueden verse diferentes materiales y su importancia para un desarrollo futuro en el campo del transporte, dicho esquema fue elaborado por la Fundación OPTI, en colaboración con la Fundación Española para la Ciencia y Tecnología (FECYT). Como se puede ver los materiales magnetoreológicos están entre los materiales de mayor interés [14].

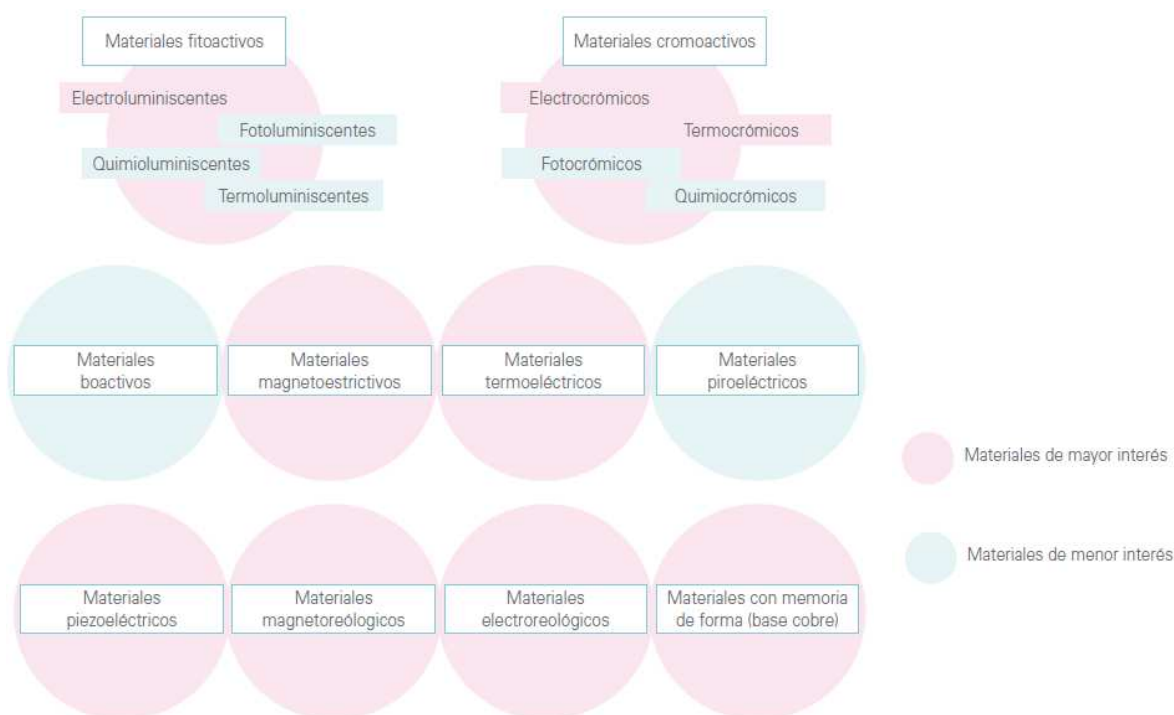


Figura 3.1. Materiales inteligentes de mayor interés para el sector de transporte

3.1.1. Componentes de un fluido MR

Para entender mejor los siguientes apartados, correspondientes a la reología y propiedades de estos fluidos, en este apartado se explican las diferentes partes de los fluidos MR.

Los componentes de estos materiales son básicamente suspensiones no coloidales de partículas magnetizables pequeñas, en una base de fluido inerte junto con algunos aditivos. De esta manera encontramos tres componentes en estos fluidos:

A. Base

El fluido base es un portador inerte o no magnético de las partículas de metal suspendidas en él. Debe tener una lubricación natural y propiedades amortiguadoras. Para que sea más fácil aplicarlo en la tecnología este fluido base debe tener una viscosidad baja y no variar con la temperatura, esto es necesario para que el efecto de variación en la viscosidad debido a un campo magnético sea dominante, en comparación con la variación de viscosidad natural. Debido a la presencia de estas partículas suspendidas la base fluida es más espesa. Usualmente los fluidos base utilizados son aceites de hidrocarburos, aceites minerales y aceites de silicona [13].

B. Partículas metálicas

Para una apropiada utilización de la tecnología con fluidos MR, se necesita un tipo de partículas que se puedan magnetizar de manera fácil y rápida, por lo que utilizamos partículas metálicas. Estas partículas son de un tamaño muy pequeño, aproximadamente del orden de 1 μm a 7 μm . Las partículas metálicas usadas comúnmente son hierro carbonilo, polvo de hierro y aleaciones de hierro cobalto.

Estas partículas tienen la propiedad de conseguir una elevada saturación magnética, debido a que son capaces de formar una cadena de magnetización fuerte. La concentración de dichas partículas en el líquido base puede llegar hasta el 50% aproximadamente [13].

Típicamente el diámetro de las partículas magnetizables está en un intervalo de 3-5 micras. Los fluidos funcionales MR pueden ser elaborados con partículas más grandes, sin embargo, la suspensión estable de partículas es cada vez más difícil según aumenta el tamaño de las partículas. El hierro carbonilo, es relativamente barato, se limita usualmente a tamaños mayores de 1-2 micras. Partículas más pequeñas son fáciles de suspender y se podrían utilizar, pero la fabricación de estas partículas es difícil. Significativamente, las partículas ferro magnéticas más pequeñas están generalmente sólo disponible como óxidos, tales como pigmentos encontrados comúnmente en los medios de grabación magnética [15].

C. Aditivos estabilizantes

Estos aditivos son necesarios añadirlos para controlar sus propiedades, entre los que se incluyen estabilizadores y surfactantes ó tensioactivos (agente activo de superficie), estos últimos sirven para disminuir la velocidad de sedimentación de las partículas de metal. Mientras las funciones de los aditivos es el control de la viscosidad del fluido, mantener la fricción entre las partículas de metal, y reducir la tasa de espesamiento del fluido debido al largo uso del fluido así los aditivos también incrementan la vida del fluido MR. Los aditivos usados normalmente son oleato ferroso y estearato de litio [13].

Estos tres componentes, definen el comportamiento magnetoreológico del fluido MR, cualquier cambio en uno de los componentes dará lugar a un cambio en la reología y en las propiedades magnetoreológicas. Es necesario una combinación óptima de estos tres componentes para lograr las propiedades deseadas [13].

3.1.2 Reología y Propiedades de un fluido MR

La reología (del griego reos fluir, y logos estudio) es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia, describe la interrelación entre fuerzas, deformaciones y tiempo. Es aplicable a todos los materiales, desde los gases hasta sólidos [17].

Si nos fijamos en la historia, esta ciencia fue "fundada" en los años veinte, pero remontándonos aún más en la historia, el filósofo griego Heraclitus, describió la reología como panta rei, es decir, todas las cosas fluyen, que en reología se traduce como, si se espera el tiempo suficiente todo fluirá. Fue Robert Hooke el primero en hablar de reología en el año 1678 en su libro "Verdadera teoría de la Elasticidad", y nueve años después Newton publicaría una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura en Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", en esta época cuando aparecieron las leyes de Hooke y Newton descritas más adelante, fue a partir del siglo XIX los científicos comenzaron a poner en duda ambas leyes. Científicos como W. Weber o J.C. Maxwell llevaron a cabo experimentos para estudiar la elasticidad. Sin embargo en "Nacimiento de la reología" no se produjo hasta 1929 por los profesores Marcus Reiner y Eugene Bingham, quienes tuvieron la necesidad de describir las propiedades de los fluidos [17][18].

En fluidos la reología es usada para describir la consistencia de diferentes fluidos, normalmente mediante la viscosidad (resistencia a fluir o "espesamiento"), y la elasticidad ("pegajosidad" o "estructura") [17].

Para entender mejor las propiedades de los fluidos MR, necesitamos entender mejor las propiedades de flujo, por lo que consideramos la manera en que fluyen dos materiales comunes. Se puede decir simplemente, que la viscosidad es la resistencia a fluir de un material, para medir este flujo es necesario confinarlo, que fluya por medios mecánicos, medir la fuerza requerida para ello y convertir las fuerzas medidas en valores específicos que se puedan comparar con otros. Si imaginamos un plato cuadrado, metálico anclado y cubierto por una capa delgada de grasa, ahora colocamos un plato igual al anterior encima a una distancia h del primero. Para deslizar el plato superior se debe aplicar sobre él una fuerza (ver Figura. 3.2), una fuerza pequeña es suficiente para mover el plato una distancia corta a una velocidad baja, pero si lo queremos mover a mayor velocidad necesitamos una fuerza mayor. Por otro lado cuanto mayor sea el valor de h (espesor de la capa de grasa), menos costará mover este plato [17].

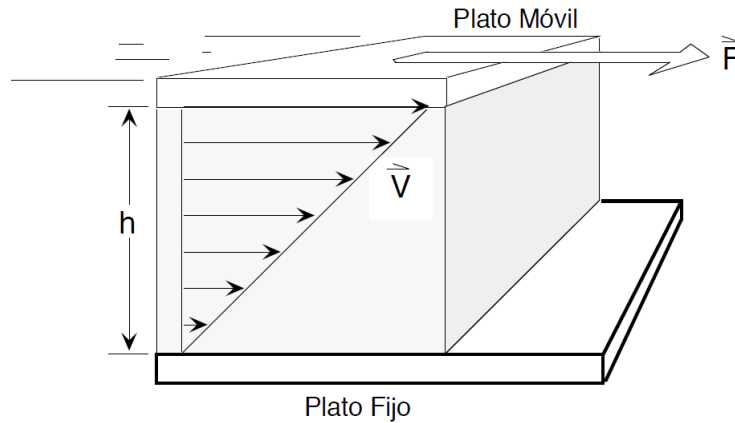


Figura 3.2. Fuerza de cizalla entre dos planos paralelos

La fuerza F requerida para mover el plato superior se relaciona con el área en contacto con la sustancia y para llegar a una medida específica es necesario dividir la fuerza total necesaria para el movimiento entre el área en contacto con dicha sustancia. A esta relación, se le denomina **Esfuerzo de Corte** τ (ver Ecuación 1) este movimiento entre plano se denomina como "corte" o "cizalla". Las unidades usuales para la fuerza son dinas (1000 dinas=peso de 1 gramo) y cm^2 .

$$\tau \left(\frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{F}{A} \left(\frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Y en el Sistema Internacional (SI) queda como la Ec. 2.:

$$\tau \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) = \frac{F}{A} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \quad (\text{Ec. 2})$$

El cizallamiento ejercido sobre el material está relacionado con la velocidad relativa de movimiento y distancia entre platos (al que hemos llamado h). A una velocidad v , se requiere un mayor esfuerzo cuando los platos están más cercanos. La medida específica de este trabajo por unidad de materia se denomina **Velocidad o Tasa de deformación o corte** (ver Ec. 3), y está definida como la velocidad relativa dividida entre la distancia de los platos, quedando la fórmula:

$$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1}) = \frac{v \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right)}{h (\text{cm})} \quad (\text{Ec. 3})$$

En este estudio de los platos, hemos visto el efecto en la fuerza sin considerar el tiempo. Ahora se supone, que el sistema está en el inicio en reposo, y después de un tiempo $t = 0$, la lámina inferior se pone en movimiento en dirección x , con velocidad constante v , es decir, el desarrollo del perfil de velocidad queda como se ve en la Figura 3.3.

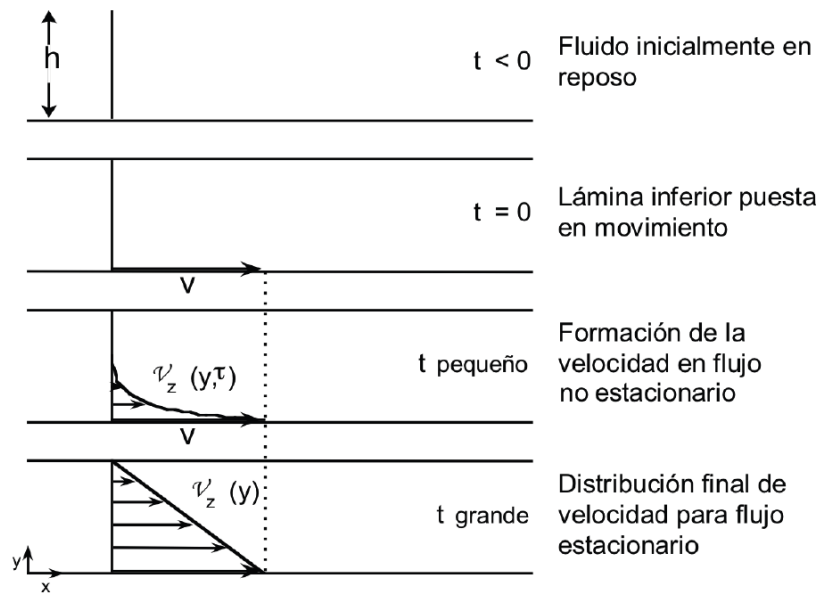


Figura 3.3. Desarrollo del perfil de velocidad

Según transcurre el tiempo el fluido va ganando **cantidad de movimiento**, y finalmente se establece el perfil de velocidad en régimen estacionario. Una vez alcanzado este estado estacionario, es necesario aplicar una fuerza F constante para conservar el movimiento de la lámina inferior. Luego para el flujo laminar se cumple la Ec. 4.[17].

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{y} \quad \text{ó} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 4})$$

Gracias a esto se puede describir la **Ley de Newton** (ver Ec. 5), la cual dice que la tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad (dv/dy). Esta ley es aplicable para unos fluidos determinados, los fluidos newtonianos. Los gases y la mayoría de líquidos sencillos se comportan de acuerdo a la siguiente a la siguiente ley:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (\text{Ec. 5})$$

Otra ley que podemos tener en cuenta para explicar el comportamiento reológico es la **Ley de Hooke** (ver Ec. 6), la cual establece que el esfuerzo cortante es proporcional al desplazamiento dividido entre el espesor, atendiendo al sistema de coordenadas usado en la Figura 3.3 nos quedaría x/y , esto sería la deformación γ . Considerando cantidades infinitesimales [17], se obtiene la Ec. 6.

$$\gamma = \frac{x}{y} = \frac{dx}{dy} \Rightarrow \tau = G\gamma \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo G el módulo de elasticidad.

Para estudiar la reología de los materiales MR se van a considerar 3 factores la viscosidad, la tensión de cizalladura y la velocidad de corte de deformación. En la mayoría de las

aplicaciones de los fluidos la viscosidad es un factor importante. En los fluidos generales, la viscosidad cambia al cambiar otras propiedades físicas como la tensión de cizallamiento, temperatura, etc.[13].

En la mayoría de aplicaciones estas propiedades físicas no se pueden controlar, ya que están gobernadas por el ambiente de trabajo. En el caso de fluidos MR, la viscosidad puede ser controlada con ayuda de un campo magnético. Reológicamente el fluido MR puede cambiar de un estado líquido a uno sólido mediante variación de la intensidad del campo magnético y siendo este cambio reversible [13]. Se va a ver qué ocurre cuando este campo magnético es aplicado o no:

1. En ausencia de campo magnético

El fluido MR se comporta como un fluido newtoniano, obedece la Ley de Newton y tiene casi las mismas características que el fluido base [13].

La representación gráfica del esfuerzo cortante vs. velocidad de cizalladura, es una recta que pasa por el origen, representado en la Figura 3.4 [17].

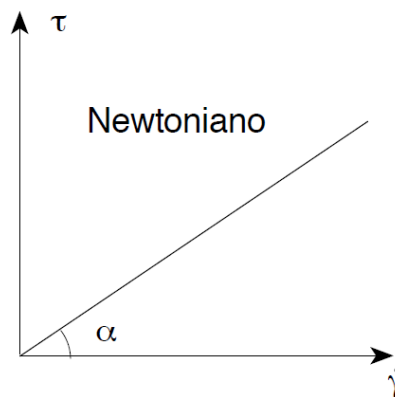


Figura 3.4. Fluido Newtoniano

La pendiente es la viscosidad: $\eta = \operatorname{tg}\alpha$

2. Cuando se aplica un campo magnético

El fluido MR se comporta como un fluido de Bingham [13], lo que significa que presenta un valor de esfuerzo cortante distinto de cero para una tasa de corte cero, comportándose más como un sólido que como un líquido, como se ve en la Figura 3.5 [16].

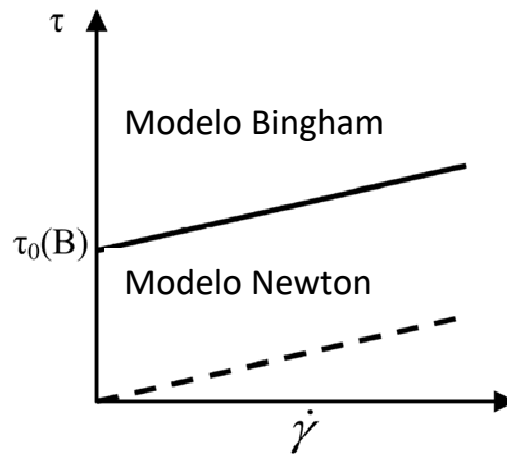


Figura 3.5. Comparación de los modelos Bingham y Newton

En el modelo de Bingham, el flujo está gobernado por la Ecuación 7 [12][15].

$$\tau = \tau_0(H) + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

τ_0 es el límite de fluencia causado por la aplicación del campo magnético [Pa]

H es la intensidad de campo magnético [A/m]

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizallamiento [s⁻¹]

η es la viscosidad plástica [Pa·s]

El límite de elasticidad a su vez depende de las características de magnetización de las partículas de metal, que dependen de la concentración y naturaleza de las partículas [13].

3.1.3 Funcionamiento de la tecnología

Las propiedades de un fluido MR pueden ser controladas mediante un campo magnético. En ausencia de un campo magnético, las propiedades son parecidas a la base, pero un poco más espesas debido a las partículas metálicas. En ausencia de campo magnético estas partículas de metal se alinean a lo largo de la dirección del flujo. El fluido sin campo aplicado puede verse en la Figura 3.6 [17].

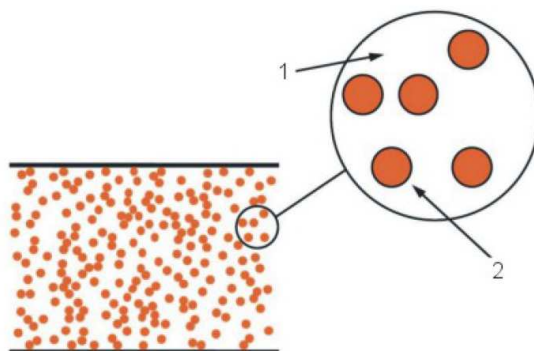


Figura 3.6. Fluido MR (1. Base fluida, 2. Partículas magnetizables)

Sin embargo cuando se aplica un campo magnético, cada una de las partículas de metal se convierte en un dipolo, y se alinean a lo largo de la dirección del campo (Figura 3.7). Por lo tanto una estructura de cadena se forma a lo largo de la línea de flujo magnético, que ofrece una resistencia mecánica para el flujo, resultando un incremento en la viscosidad del fluido.

Esta resistencia mecánica creada debido a la a la columna de la cadena, imparte resistencia a la fluencia del fluido, por lo que es rígido como un semi-sólido. Esta rigidez, y por lo tanto el límite elástico, depende de la fuerza del campo magnético y también de la calidad y cantidad de partículas de metal.

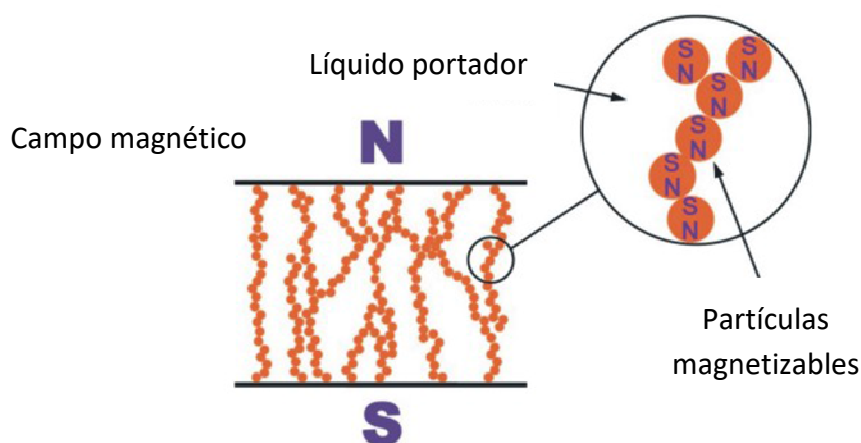


Figura 3.7. Fluido MR con campo magnético externo

El efecto MR es reversible, cuando se deja de aplicar campo magnético el fluido vuelve a sus condiciones originales. Los fluidos MR con sus propiedades controlables pueden ser útiles en

la puesta en práctica de fluidos inteligentes, ya que el movimiento del fluido es controlado por la variación de su viscosidad con la ayuda de magnetización. La sencillez de la tecnología MR, la capacidad de control y la rápida respuesta de las propiedades reológicas hace que sea un fluido inteligente con áreas de aplicación donde el movimiento del fluido se controla variando la viscosidad, aplicaciones que se verán en el siguiente apartado [17].

3.1.4 Modos y Aplicaciones

Ya que los materiales MR pueden ser controlados mediante aplicación de un campo magnético, estos materiales son útiles donde se requiera un funcionamiento variable.

Microprocesadores, tecnología de sensores y aumento de contenido electrónico y velocidades de procesamiento han creado posibilidades de control en tiempo real de sistemas inteligentes usados en dispositivos MR.

Desde su inicio de comercialización, el uso de dispositivos MR ha ido creciendo constantemente. Durante los últimos años, se han desarrollado una serie de productos disponibles en el mercado como pueden ser:

- Amortiguadores lineales MR para sistemas de control de vibración activos en tiempo real en camiones pesados.
- Frenos lineales y rotativos de bajo coste para la posición y el control de la velocidad de sistemas de actuadores neumáticos.
- Frenos rotatorios para proporcionar fuerza de retroalimentación táctil en sistemas de dirección de cable.
- Amortiguadores lineales para control de la marcha en tiempo real en dispositivos protésicos avanzados.
- Absorbentes de choque ajustables para automóviles controlados en tiempo real.
- Amortiguador MR de esponja para lavadoras.
- Herramientas de pulido.
- Amortiguadores grandes de fluidos MR para mitigación de daño sísmico en estructuras de ingeniería civil.
- Amortiguadores MR grandes para control vibraciones inducidas por el viento en puentes atirantados. [15]

Es necesario saber, cómo se llevan a cabo estas aplicaciones. Estos dispositivos necesitan de diferentes geometrías para explotar los fluidos MR. Existen tres vías principales de explotación:

- A. Modo de cizalladura
- B. Modo comprimido
- C. Modo de flujo

A. Modo de cizalladura

En este modo el flujo fluye entre las dos superficies teniendo un movimiento relativo, y un campo magnético aplicado en dirección perpendicular al flujo, ver el esquema de la Figura 3.8.

Este modo se utiliza principalmente en aplicaciones giratorias, en diferentes tipos de frenos y embragues de vehículos.

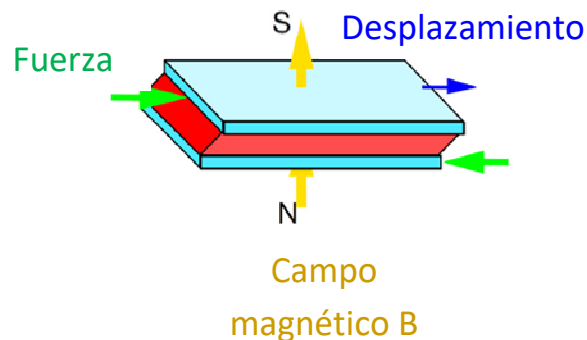


Figura 3.8. Modo de cizalladura

La fuerza total desarrollada (Ec. 8) en este modo, es la suma de la fuerza desarrollada debida a la viscosidad del fluido (F_v) y la fuerza debida al campo magnético (F_m).

$$F = F_v + F_m \quad (\text{Ec. 8})$$

El funcionamiento de un freno con tecnología MR es el siguiente, hay un cilindro estacionario externo y uno interno giratorio y el espacio entre estos está lleno de fluido MR. En ausencia del campo magnético el cilindro giratorio está libre, pero cuando las bobinas se energizan creando un campo magnético, el fluido MR se empieza a comportar como semisólido, ofreciendo un par resistente sobre el cilindro giratorio. Todo esto ocurre en milisegundos después de energizar la bobinas. El par de frenado se controla mediante la variación de la intensidad del campo magnético. El esquema del freno puede verse en la Figura 3.9.

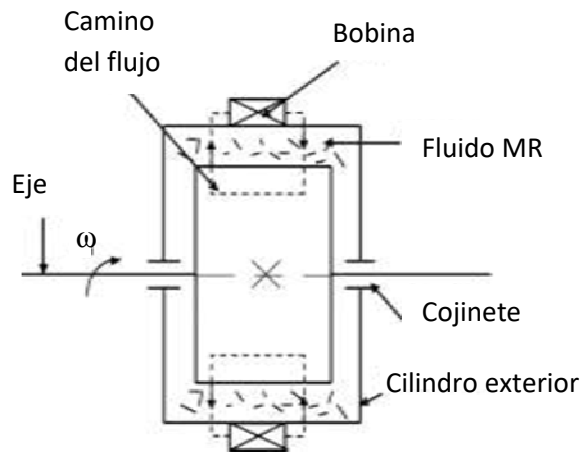


Figura 3.9. Freno con fluido MR

Si observamos un freno de vehículo convencional, este presenta varias desventajas, sin embargo en un sistema MR tiene varias ventajas, si miramos la Tabla 3.1 vemos la comparación entre un sistema convencional y uno MR [13].

Tabla 3.1. Desventajas del freno convencional y ventajas del freno MR

Desventajas Freno convencional	Ventajas Freno MR
Consumo de gran energía	Requiere baja energía (unos amperios)
Voluminosos	Diseño y construcción simple
Fugas hidráulicas	Libre de hidráulica (requiere menos espacio)
Ruido de fricción entre metales	No se friccionan metales
Cambios periódicos en las pastillas	No se necesitan pastillas
Retardos por acumulación de presión	Respuesta rápida

En la Figura 3.10 pueden observarse otros modos de funcionamiento de esta tecnología.

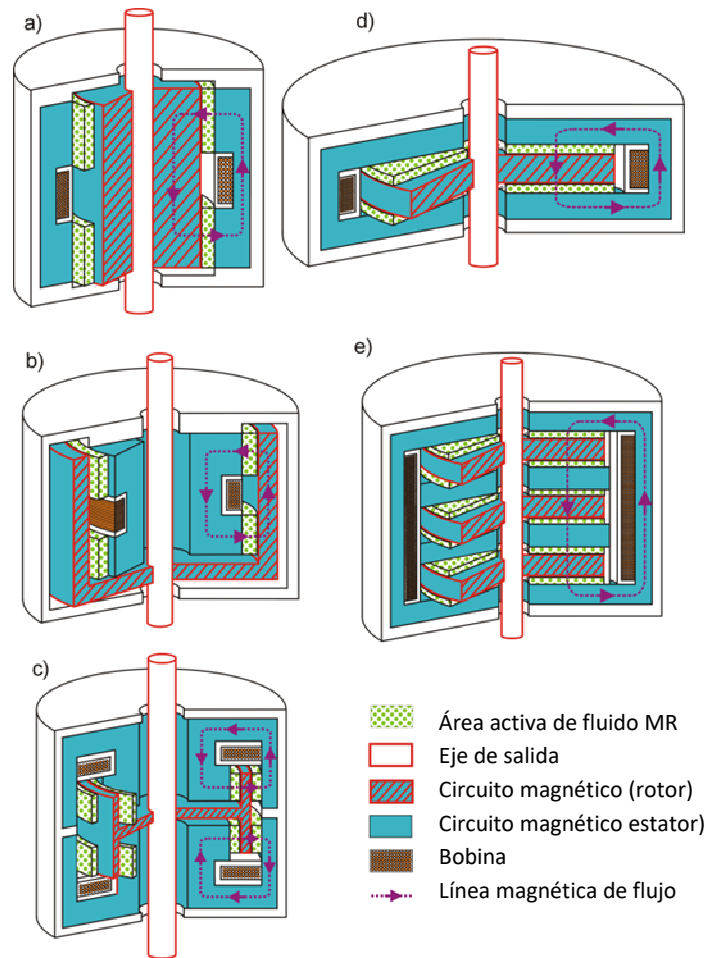


Figura 3.10. Diferentes tipos de diseños de frenos MR: a) de tambor, b) de tambor invertido, c) rotor en forma de T, d) discos, e) discos múltiples.

B. Modo comprimido

Este modo se utiliza para movimientos bajos y aplicaciones de alta fuerza. Ha sido menos desarrollado que los modos de cizalladura y flujo. En este modo la fuerza externa aplicada es absorbida con la ayuda del fluido MR [13]. El esquema de este modo de funcionamiento se encuentra en la Figura 3.11.

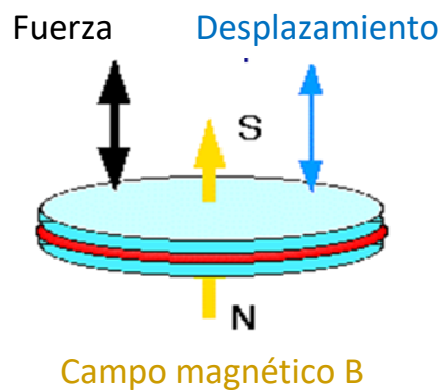


Figura 3.11. Modo comprimido

C. Modo de flujo

A este modo de operación de fluidos MR, también se le llama modo de válvula, y utiliza el fluido a través de dos superficies fijas, y el campo magnético es aplicado perpendicular a la dirección del flujo (ver Figura 3.12). La resistencia del fluido MR puede ser controlada mediante la intensidad del campo magnético, de este modo esta tecnología puede usarse en diversos tipos de amortiguadores y absorbentes de choques, y tiene una amplia aplicación en la industria del automóvil [13].

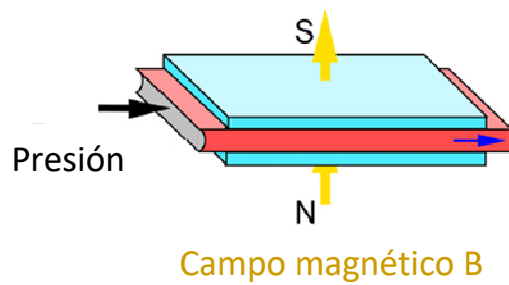


Figura 3.12. Modo de flujo

La presión total de este modo de aplicación es la Ec. 9, la suma de la presión desarrollada debido a la viscosidad del fluido (ΔP_v), y la presión debida al campo magnético (ΔP_m).

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_m \quad (\text{Ec. 9})$$

Este tipo de modo de aplicación se utiliza en amortiguadores magnetorreológicos, de los cuáles se hablará en siguiente apartado 3.2.

3.2 Amortiguadores magnetoreológicos

Este apartado se dedica a la descripción de los amortiguadores MR más comunes, su funcionamiento y aplicaciones.

En los amortiguadores convencionales, el fluido fluye desde el cilindro interior al cilindro exterior a través de válvulas. En el cilindro exterior hay aire y líquido, cuando el pistón se mueve hacia abajo el nivel de líquido en el cilindro exterior aumenta, y el aire libre se comporta como un medio comprimido produciendo el efecto de amortiguación. Cuando el pistón se expande el flujo se invierte, este proceso puede verse en la Figura 3.13.

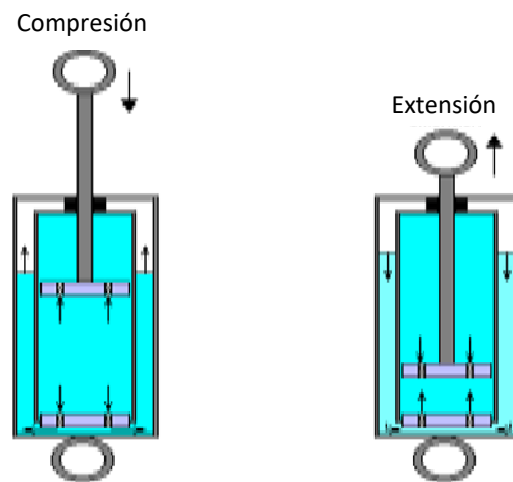


Figura 3.13. Amortiguador convencional

Los amortiguadores MR son diferentes de los convencionales, no tienen válvulas en el pistón como los convencionales, sino que tienen un orificio de paso anular, a través del cual el fluido MR se transmite de una cámara a otra, este funcionamiento puede verse en la Figura 3.14.

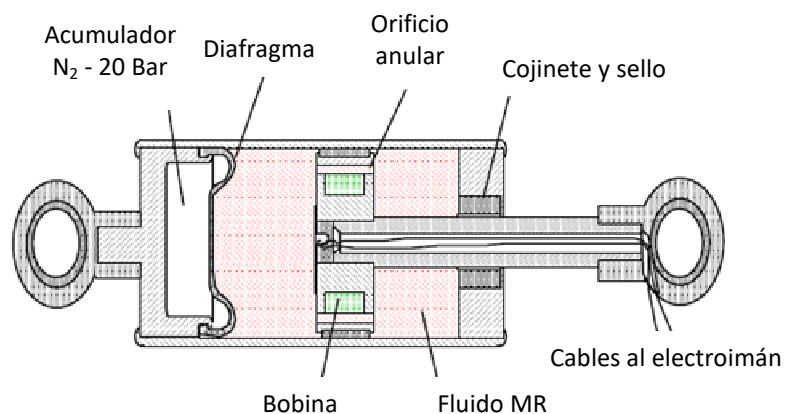


Figura 3.14. Amortiguador de fluido MR

En condiciones no magnéticas, el fluido puede moverse a través del orificio, pero cuando se necesita suspensión, la bobina se activa fluyendo corriente a través de ella desarrollándose un

campo magnético. Debido a este campo magnético el fluido en el orificio se comporta como semi-sólido y ofrece resistencia al flujo de fluido. De esta manera el fluido en la cámara empieza a comportarse como un medio para absorber choques.

Estos amortiguadores se utilizan principalmente para el control de vibraciones en los asientos de los vehículos. Es una tecnología que presenta ciertas ventajas como la rapidez, eficacia y requiere menor mantenimiento [13].

Existen diferentes tipos de configuraciones usadas en amortiguadores MR, en este apartado se estudian 3 de ellas: el que ya se ha descrito es el tipo denominado Monotubo, siendo el más utilizado, el Bitubo, y el de Doble vástago o salida [19].

1. Mono tubo

Este tipo de configuración acaba de ser explicado sin embargo existen dos tipos de funcionamiento posibles:

- a) El primer caso, el circuito magnético está contenido por completo en el pistón. (Figura 3.15.a), el espacio de aire se mecaniza en el interior del pistón y el cilindro está bloqueado por un sello. El dispositivo funciona en modo flujo también llamado válvula. El flujo se establece debido a la diferencia de presión de las cámaras de fluido MR situadas a ambos lados del pistón.
- b) En el segundo tipo de funcionamiento el circuito magnético es móvil, y el espacio de aire entre el pistón móvil y el cuerpo del amortiguador sirve de guía al flujo magnético. En este tipo de funcionamiento opera simultáneamente en modo válvula, debido a la diferencia de presión a ambos lados del pistón, y en modo de cizalladura debido al movimiento relativo del pistón con respecto al cilindro (Figura 3.15b).

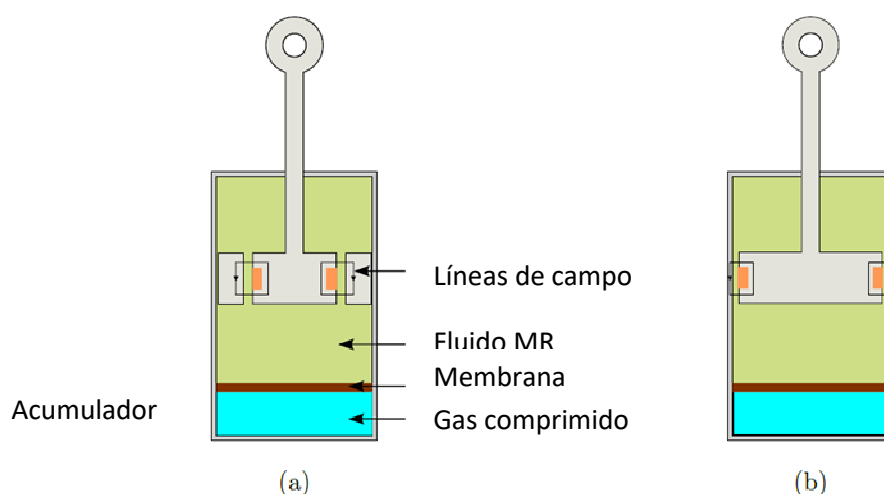


Figura 3.15. Geometrías de los amortiguadores monotubo funcionando en: a) modo válvula y b) modo válvula y cizalladura

2. Bitubo

Este tipo de geometría llamado bitubo o de doble cilindro, se compone de dos tubos coaxiales, de esta forma tiene una cámara externa y una interna. Ambos depósitos están separados por un dispositivo de tipo válvula. Mientras se usa el amortiguador, los cambios de volumen en la cámara interior se compensan por el fluido del tanque externo. Cuando trabaja bajo compresión, el fluido va desde el tanque interior al exterior y viceversa. Al igual que en el amortiguador mono tubo existen dos tipos de configuraciones, un esquema de este amortiguador se muestra en la Figura 3.16.

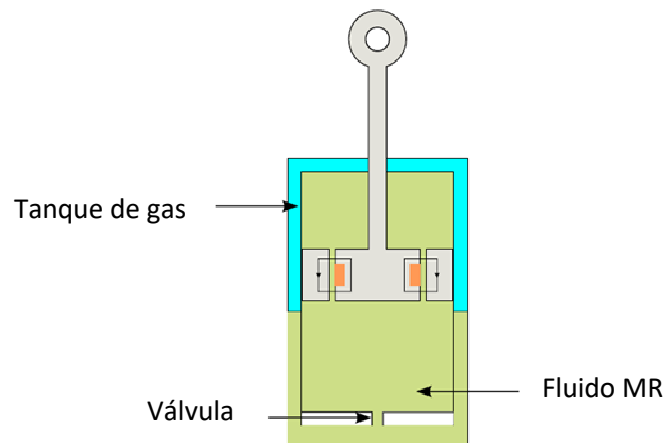


Figura 3.16. Esquema de un amortiguador bitubo

3. Doble vástago

En este tipo de configuración no hay dispositivo de compensación de volumen, ya que el volumen entrante en el primer vástago es compensado por el volumen saliente del segundo vástago. Este doble vástago se puede ver en la Figura 3.17.

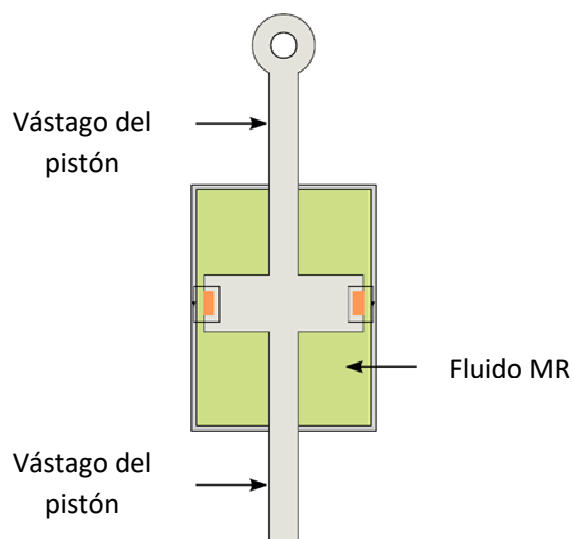


Figura 3.17. Amortiguador de doble barra o doble salida

CAPÍTULO 4: Modelado del amortiguador magnetoreológico en Simulink

4.1 Modelo de Bouc-Wen mejorado

Existen muchos modelos mecánicos para describir el comportamiento dinámico de los amortiguadores magnetoreológicos. Este comportamiento dinámico nos permite ver la relación existente entre diferentes variables, como pueden ser la fuerza del amortiguador, la velocidad.

En este Proyecto se estudia en concreto, el modelo Bouc-Wen mejorado de Spencer Jr. et al. (1997), cuya solución es la de un modelo modificado de Bouc-Wen gobernado por las ecuaciones de la 10 a la 16 mostradas más abajo, y el modelo mostrado en la Figura 4.1 [20].

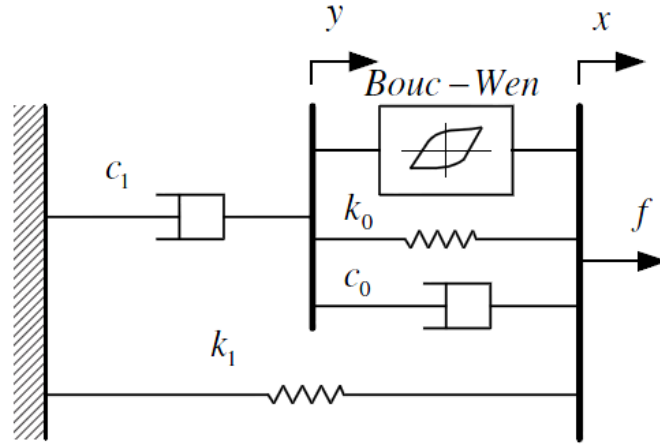


Figura 4.1. Modelo mecánico para MR amortiguador

Las ecuaciones del modelo son las siguientes (Spencer Jr. et al., 1997):

$$f = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (\text{Ec. 13})$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (\text{Ec. 14})$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (\text{Ec. 16})$$

donde se tiene la fuerza del amortiguador f , y donde z es una variable evolutiva para representar el ciclo de histéresis, α es una constante, v es la tensión, estos y los demás parámetros del modelo son los que se adjuntan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros para el modelo de amortiguador MR (Spencer Jr. et al. , 1997).

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
c_{0a}	$2.10 \times 10^3 \text{ Ns/m}$	α_a	$1.40 \times 10^4 \text{ N/m}$	x_0	0.143 m
c_{0b}	$3.50 \times 10^2 \text{ Ns/mV}$	α_b	$6.95 \times 10^4 \text{ N/mV}$	η	190 s^{-1}
k_0	$4.69 \times 10^3 \text{ N/m}$	γ	$3.63 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$	k_1	500 N/m
c_{1a}	$2.83 \times 10^4 \text{ Ns/m}$	β	$3.63 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$	n	2
c_{1b}	$2.95 \times 10^2 \text{ Ns/mV}$	A	301		

Hay que tener en cuenta que este modelo de Bouc-Wen mejorado presenta histéresis. La amortiguación por histéresis o material se da cuando se deforma un material, la energía es absorbida por el material. Este efecto es debido a la fricción entre los planos internos, los cuales resbalan o deslizan como las deformaciones que se producen. Cuando en un cuerpo se tiene este tipo de amortiguación se somete a vibraciones, el diagrama de tensión-deformación presenta un bucle, llamado bucle de histéresis. El área de este bucle indica la energía perdida por unidad de volumen del cuerpo por ciclo debido a la amortiguación. Este ciclo puede verse en la Figura 4.2 [28].

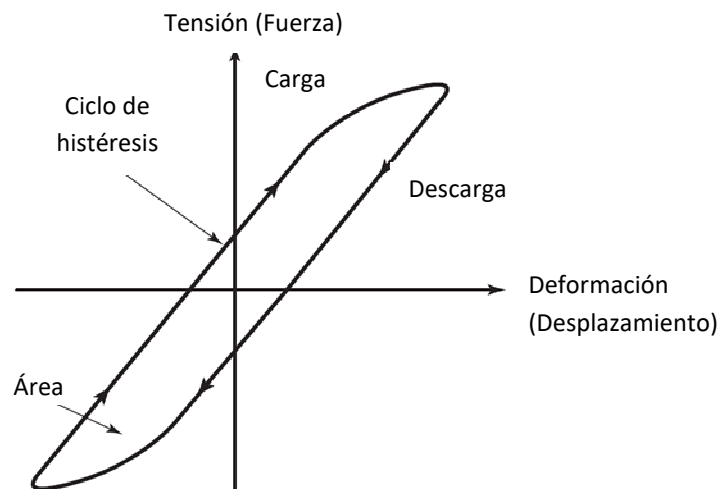


Figura 4.2. Ciclo de histéresis para materiales elásticos

Cuando se incrementa la carga en un cuerpo elástico, la tensión (σ) y la deformación (ε) en el cuerpo también se incrementan. El área bajo la curva tensión-deformación (σ - ε), está dada por la ecuación 17.

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (\text{Ec. 17})$$

Esta ecuación expone la energía gastada (trabajo realizado), por unidad de volumen del cuerpo. Cuando la carga en el cuerpo se disminuye, la energía se recupera. El camino de descarga es diferente del camino de carga, el área ABC en la Figura 4.3 (el área del ciclo de histéresis de la Figura 4.2) denota la energía perdida por unidad de volumen del cuerpo [28].

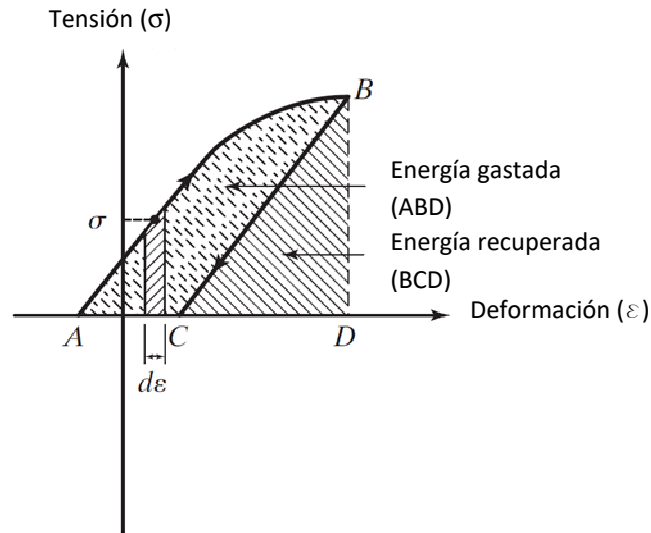


Figura 4.3. Detalle del ciclo de histéresis para materiales elásticos

4.2 Modelado en Simulink
















Dentro del entorno de programación de MATLAB existe un entorno de programación visual llamado Simulink, que permite programar las fórmulas descritas en el apartado anterior para el amortiguador.

Simulink es un entorno para la simulación y el diseño basado en diagramas contruidos a partir de diagramas de bloques. Permite diseñar, simular, generar y verificar los sistemas. Se integra con MATLAB lo que permite exportar resultados de la simulación a MATLAB para más análisis [21].

Para implementar las ecuaciones del modelo, únicamente es necesario dividir estas ecuaciones en bloques, y unirlos mediante flechas. Este modelo debe tener una entrada, y una salida. En este caso, se pone como entrada el desplazamiento (x), y como salida la fuerza del amortiguador (F). Para mejorar la visualización de las ecuaciones se han realizado subsistemas, que consiste en simplificar la programación, unificando una ecuación en un sólo bloque.

Los bloques que se van a usar para programar son los mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Simbología Simulink

Representación	Significado
	Constante
	Entrada
	Salida
	Producto
	Suma
	Resta
	División
	Subsistema
	Integración
	Derivación
	Ganancia
	Valor absoluto
	Elevación
	Señal sinusoidal
	Envía valores al Workspace de MATLAB

A continuación se muestra el desarrollo de las ecuaciones, para mejorar su visualización y comprensión ha sido dividido en las diferentes páginas comenzando con las ecuaciones de α , c_0 , c_1 , y u de la Figura 4.4.

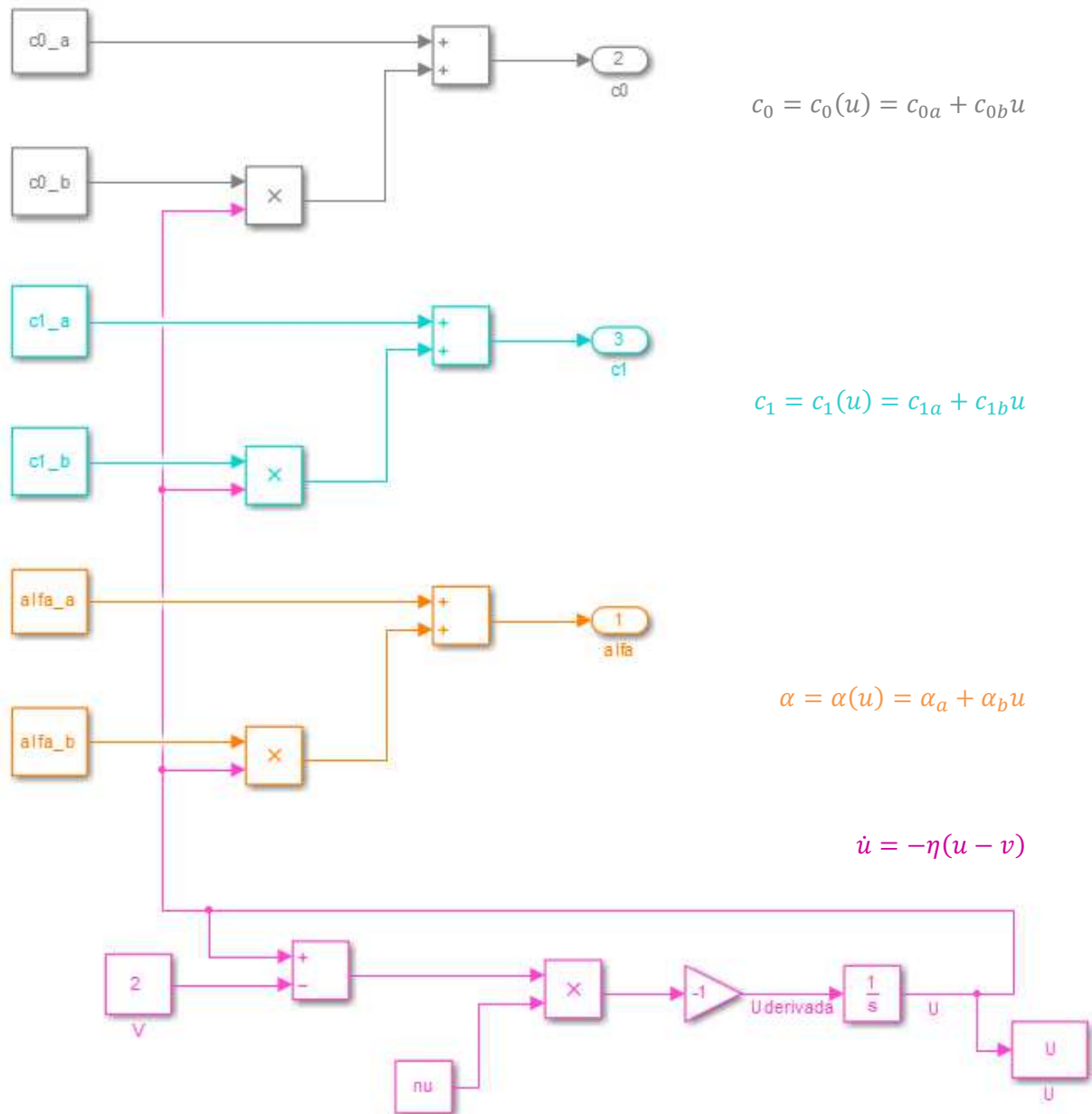


Figura 4.4. Ecuaciones de α , c_0 , c_1 , y u en Simulink

Para sacar la ecuación de f , debemos obtener primero el valor de y , que a su vez depende de z . Lo que se hace, es ver ambas ecuaciones por separado, dejando una en función de la otra, y a su vez se hace lo mismo con la ecuación de la f , se deja indicada en función de y , y finalmente se muestra cómo se une todo. La primera ecuación (y) se muestra en la Figura 4.5, la segunda (z) en la Figura 4.6, y la tercera (f) en la Figura 4.7.

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)]$$

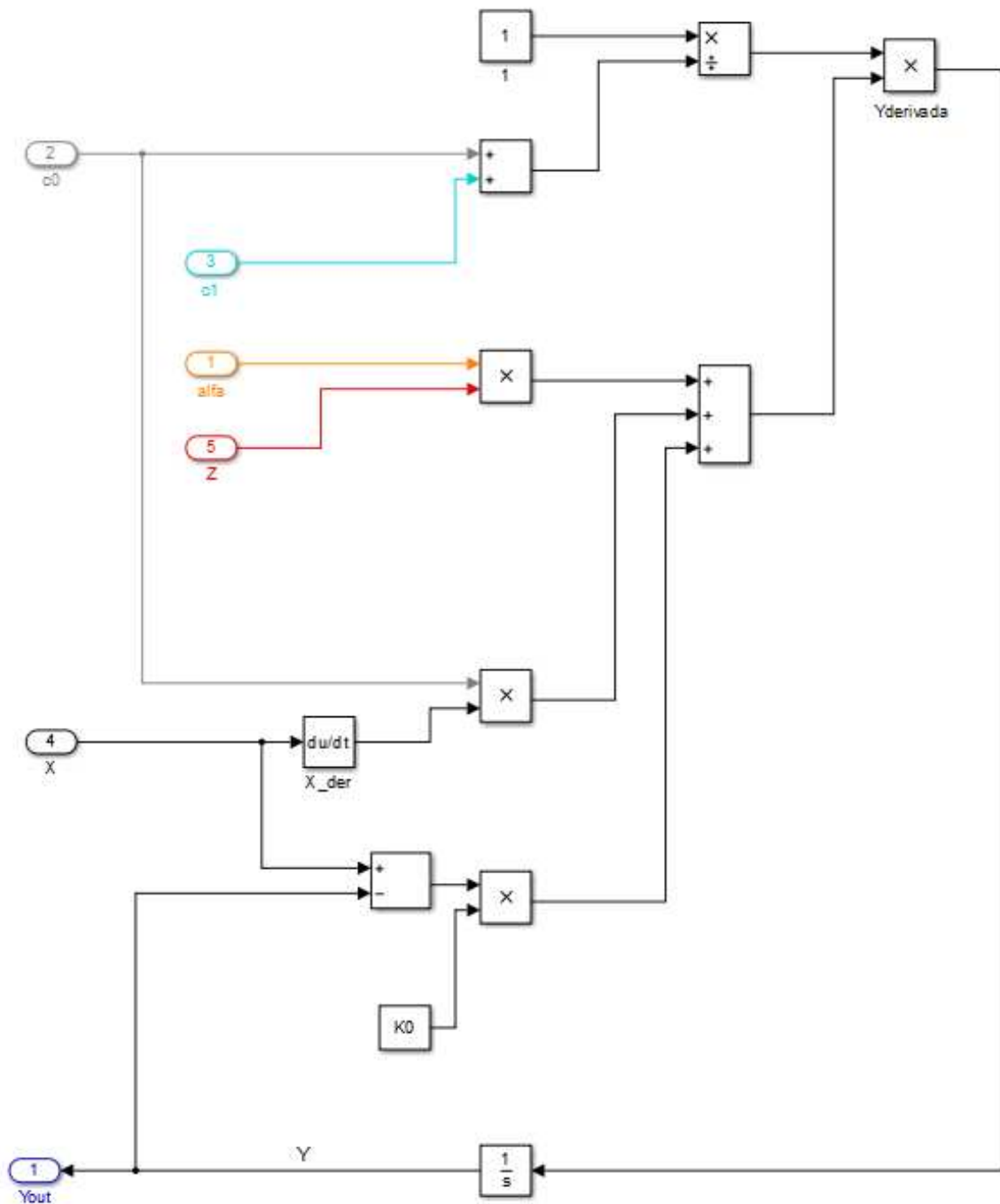


Figura 4.5. Ecuación de y en Simulink

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}||z|^{n-1}z - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y})$$

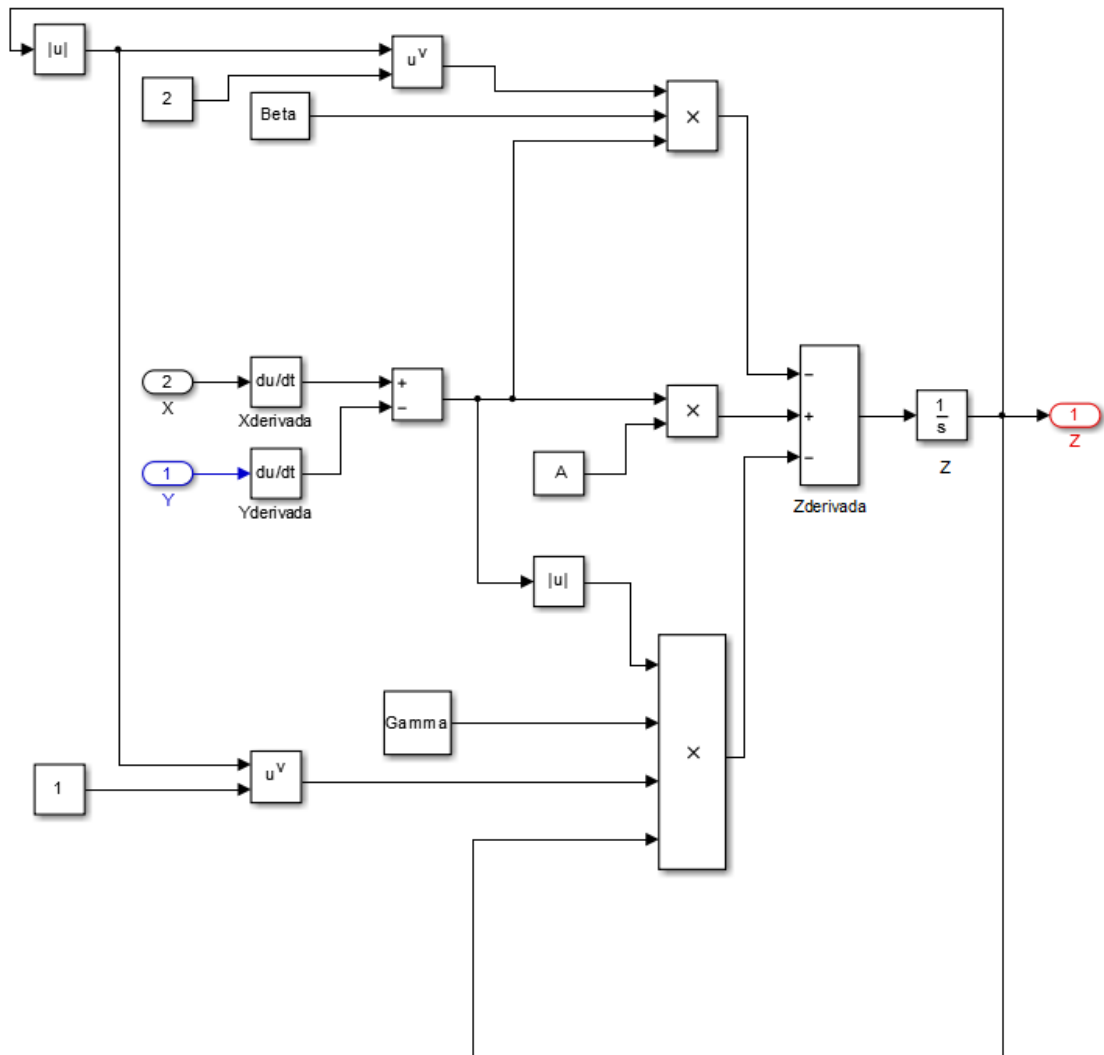


Figura 4.6. Ecuación de z en Simulink

$$f = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0)$$

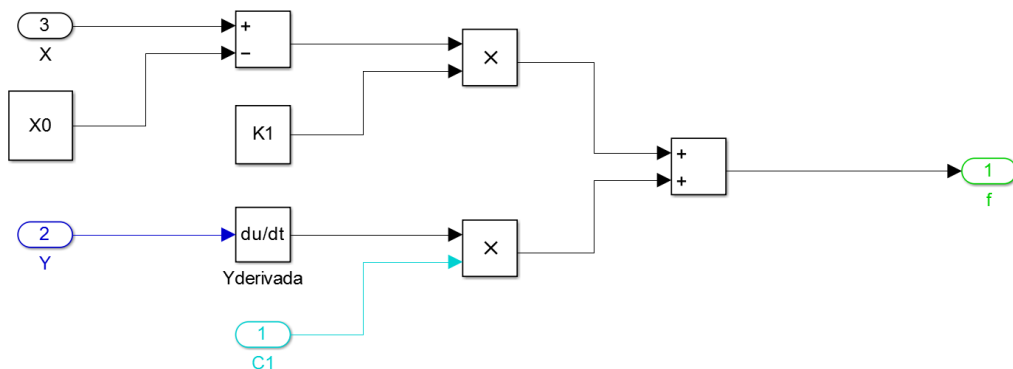


Figura 4.7. Ecuación de la fuerza del amortiguador en Simulink

El conjunto entero tiene como resultado final el mostrado en la Figura 4.8.

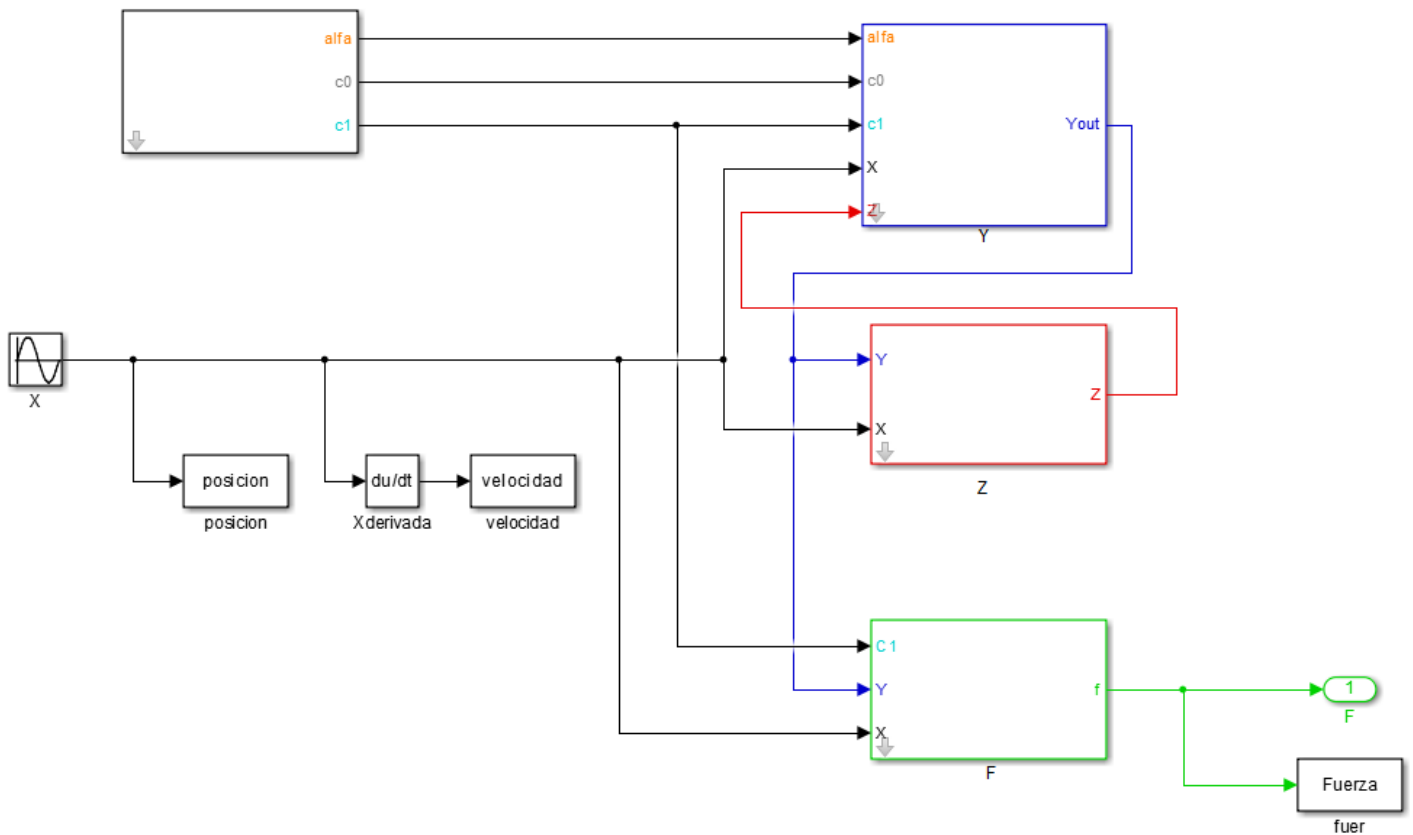
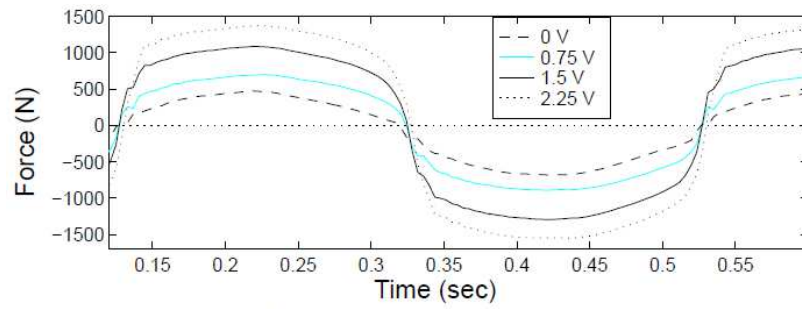


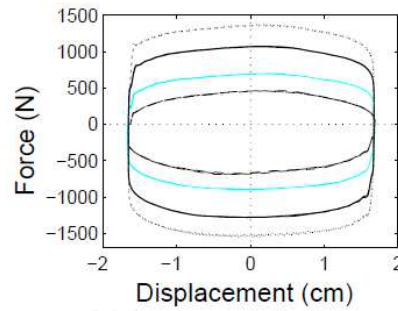
Figura 4.8. Modelo de Bouc-Wen en Simulink

Cómo ya se ha mencionado en el apartado anterior, este modelo presenta histéresis, y una forma de comprobar el funcionamiento del amortiguador es obteniendo la gráfica de velocidad VS Fuerza, y de la "posición" del extremo del muelle frente a la velocidad para ver esta histéresis.

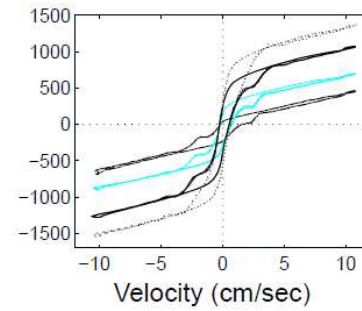
Una buena forma de comprobar estos resultados, es comparándolos con los del artículo presentado por Spencer et. al. en el año 1996, en donde de forma experimental con un amortiguador MR, comparaban sus valores experimentales con los predichos. En este Proyecto, se hace lo mismo, se comparan los valores experimentales con los del modelo de amortiguador. En la Figura 4.9 podemos ver diferentes gráficas para distintos valores de tensiones, con una señal sinusoidal de entrada de 2.5 Hz y 1.5 cm de amplitud, estos son los valores experimentales de Spencer et. al. [29].



a) Force vs. Time



b) Force vs. Displacement



c) Force vs. Velocity

Figura 4.9. Resultados experimentales de Spencer et. al.

Si se hacen las mismas gráficas, se obtienen los resultados de la Figura 4.10.

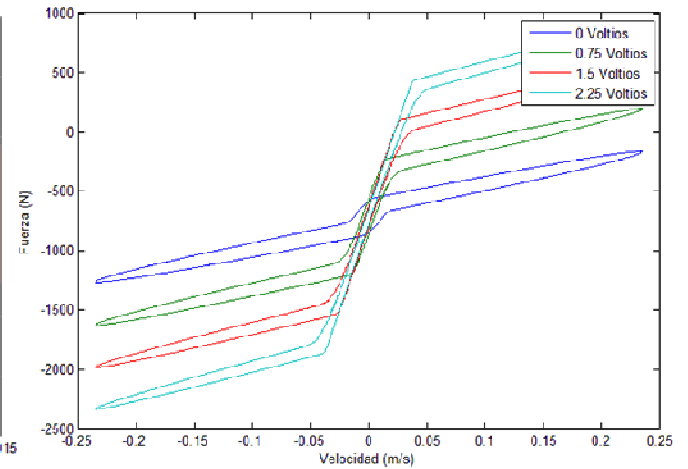
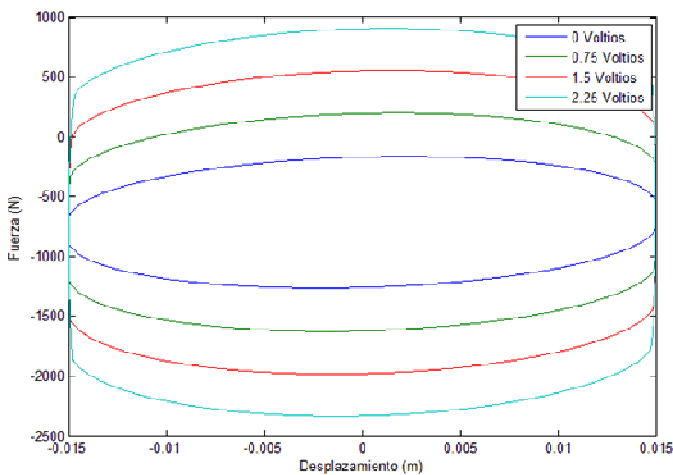
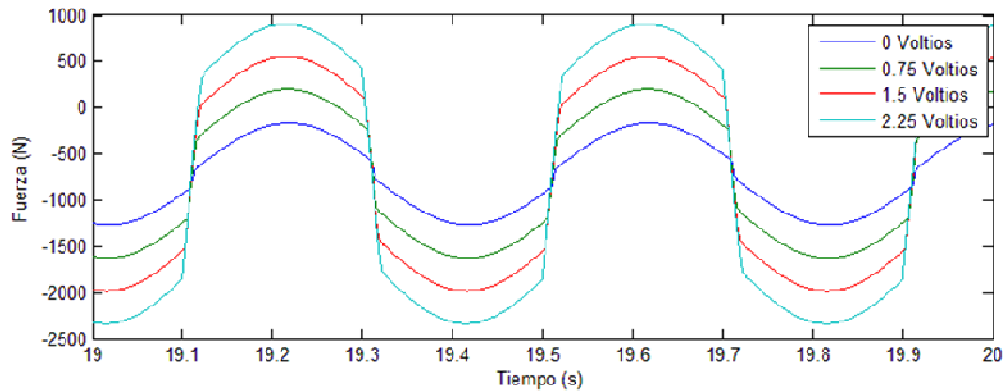


Figura 4.10. Resultados del modelo de amortiguador MR

Si se comparan los resultados, se puede decir, que el modelo de amortiguador desarrollado se ajusta a los datos experimentales de Spencer, los rangos de las magnitudes se asemejan bastante, además de la forma de las gráficas que varía con el voltaje.

Por lo tanto, se puede empezar a operar con este modelo en Simulink. Se utiliza en el tren modelado en Simpack así como en el modelo de 9 grados de libertad que se describe en el capítulo 5.

Es importante saber, que para utilizar este modelo de amortiguador en el programa Simpack se debe crear una red neuronal del modelo de amortiguador, por ello en el capítulo 7 se explica que es una red neuronal y se crea una a partir del modelo.

CAPÍTULO 5: Modelo de vehículo de 9 GDL

5.1 Ecuaciones del modelo de 9 GDL

En este capítulo, se ve como se construye un modelo de vehículo de 9 GDL mediante Simulink, en el que se implementan los amortiguadores MR ya modelados. Hay que indicar que el vehículo ferroviario que se va a modelar, no es el mismo que se crea en el capítulo 6 con el programa Simpack. El modelo de este capítulo se basa en el artículo de W.H. Liao y D.H Wang *Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers* para facilitar su implementación. No obstante, son modelos similares, aunque cambian algunos valores y la suspensión primaria en este modelo incorpora amortiguación lateral, algo que no se tiene en el modelo de Simpack.

Para realizar el modelo de tren en Simulink, se sigue el mismo desarrollo que para las ecuaciones del amortiguador MR. Mediante una serie de ecuaciones se desarrolla un modelo de 9GDL que sirve de vehículo ferroviario. El modelo de vehículo ferroviario utiliza los parámetros y ecuaciones detalladas a continuación en la Figura 5.1 [20].

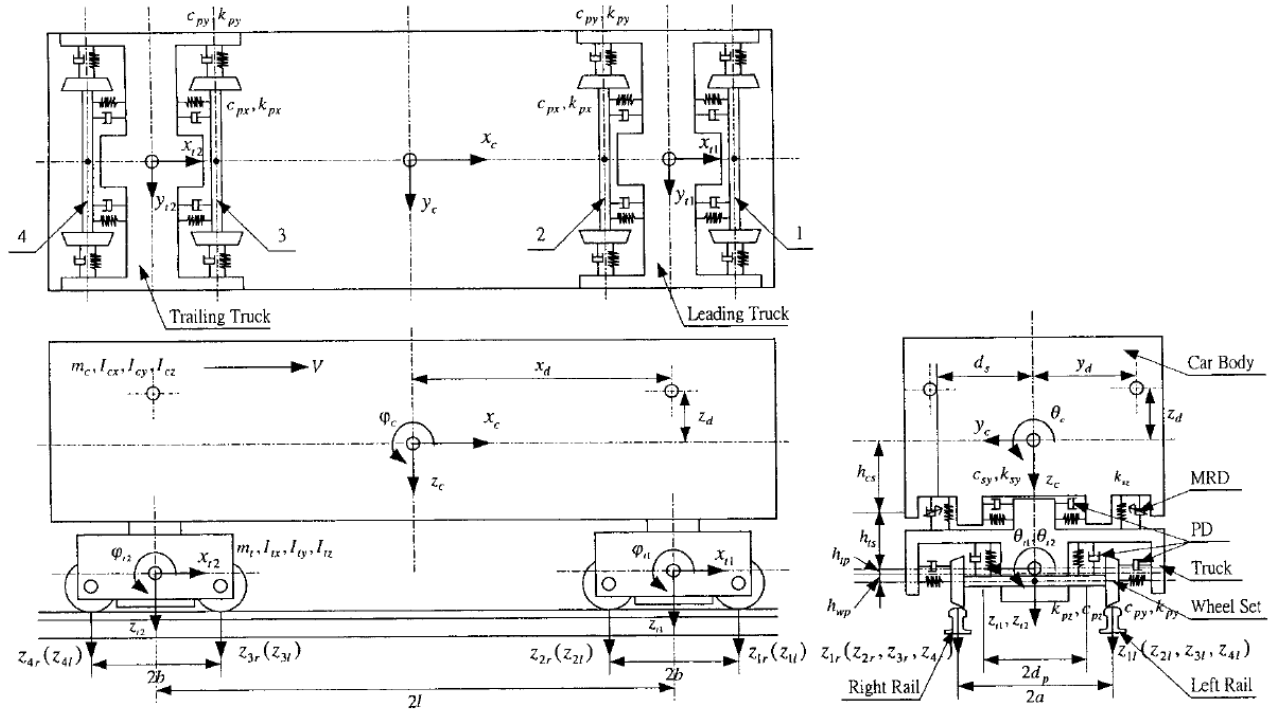


Figura 5.1. Modelo de 9 GDL de un vehículo ferroviario con amortiguadores MR(MRD)

Las ecuaciones que rigen el cuerpo del vehículo son la 18, 19 y 20.

$$m_c \ddot{z}_c = F_{szlr} + F_{szll} + F_{sztr} + F_{sztl} + f_{szlr} + f_{szll} + f_{sztr} + f_{sztl} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$I_{cy} \ddot{\phi}_c = (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{cs} + (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{cs} - (F_{szlr} + F_{szll})l + (F_{sztr} + F_{sztl})l - (f_{szlr} + f_{szll})l + (f_{sztr} + f_{sztl})l \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\begin{aligned}
I_{cx}\ddot{\theta}_c = & -(F_{sytr} + F_{syll})h_{cs} - (F_{sytr} + F_{sytl})h_{cs} \\
& + (F_{szlr} + F_{sztr})d_s - (F_{szll} + F_{sztl})d_s \\
& + (f_{szlr} + f_{sztr})d_s - (f_{szll} + f_{sztl})d_s
\end{aligned} \tag{Ec. 20}$$

Las ecuaciones para el carro principal son la 21, 22 y 23.

$$m_t\ddot{z}_{t1} = -(F_{szlr} + F_{szll}) + (F_{pz1r} + F_{pz2r}) + (F_{pz1l} + F_{pz2l}) - (f_{szlr} + f_{szll}) \tag{Ec. 21}$$

$$\begin{aligned}
I_{ty}\ddot{\phi}_{t1} = & (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{ts} + (F_{px1r} + F_{px1l})h_{tp} + (F_{px2r} + F_{px2l})h_{tp} \\
& - (F_{pz1r} + F_{pz1l})b + (F_{pz2r} + F_{pz2l})b
\end{aligned} \tag{Ec. 22}$$

$$\begin{aligned}
I_{tx}\ddot{\theta}_{t1} = & -(F_{sytr} + F_{syll})h_{ts} - (F_{szlr} - F_{szll})d_s - (F_{py1r} + F_{py2r})h_{tp} \\
& - (F_{py1l} + F_{py2l})h_{tp} + (F_{pz1r} + F_{pz2r})d_p \\
& - (F_{pz1l} + F_{pz2l})d_p - (f_{szlr} - f_{szll})d_s
\end{aligned} \tag{Ec. 23}$$

Las ecuaciones para el carro que arrastra son la 24, 25 y 26.

$$m_t\ddot{z}_{t2} = -(F_{sztr} + F_{sztl}) + (F_{pz3r} + F_{pz3l}) + (F_{pz4r} + F_{pz4l}) - (f_{sztr} + f_{sztl}) \tag{Ec. 24}$$

$$\begin{aligned}
I_{ty}\ddot{\phi}_{t2} = & (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{ts} + (F_{px3r} + F_{px3l})h_{tp} + (F_{px4r} + F_{px4l})h_{tp} \\
& - (F_{pz3r} + F_{pz3l})b + (F_{pz4r} + F_{pz4l})b
\end{aligned} \tag{Ec. 25}$$

$$\begin{aligned}
I_{tx}\ddot{\theta}_{t2} = & -(F_{sytr} + F_{sytl})h_{ts} - (F_{sztr} - F_{sztl})d_s - (F_{py3r} + F_{py4r})h_{tp} \\
& - (F_{py3l} + F_{py4l})h_{tp} + (F_{pz3r} + F_{pz4r})d_p \\
& - (F_{pz3l} + F_{pz4l})d_p - (f_{sztr} - f_{sztl})d_s
\end{aligned} \tag{Ec. 26}$$

En las ecuaciones de la 18-26, F con diferentes subíndices representan las fuerzas de suspensión producidas por las suspensiones primarias y secundarias, y f_{szlr} , f_{szll} , f_{sztr} y f_{sztl} representan las fuerzas de amortiguación producidas por el correspondiente amortiguador MR. En los subíndices de F y f, la primera letra (s ó p), se utiliza para representar las suspensiones primarias y secundarias respectivamente (s de suspensión secundaria, p de suspensión primaria). La segunda letra de los subíndices (x, y ó z) representan las direcciones de las fuerzas de suspensión y amortiguación. La tercera letra (l, t, 1-4) de los subíndices se utiliza para identificar los carros o bogies (l el carro principal, t el carro que arrastra) y los juegos de ruedas (1-4 representan los juegos de ruedas del 1 al 4). La última letra de los subíndices (r ó l) se utiliza para identificar el lado del sistema de suspensión para las fuerzas correspondientes (r lado derecho, l lado izquierdo de la carrocería del vehículo, los bogies y los juegos de ruedas).

Para poder completar las anteriores ecuaciones se necesitan una serie de fórmulas y valores que están incluidas en el Anexo B [20].

5.2 Modelo en Simulink

Para el desarrollo de las ecuaciones se vuelve a utilizar el entorno de Matlab, Simulink. Se programan las ecuaciones anteriores en Simulink, incluyendo el modelo de amortiguador MR del capítulo 4.

Se necesitan cuatro amortiguadores MR en el modelo de 9 GDL (llamados MRD en la Figura 5.1), situados verticalmente en la suspensión secundaria. Se sitúan en el bogie delantero y trasero a derecha e izquierda (4 en total), en la Figura 5.2 se ven en color naranja los amortiguador MR para estas 4 posiciones, que se unen al modelo de 9 GDL en color verde.

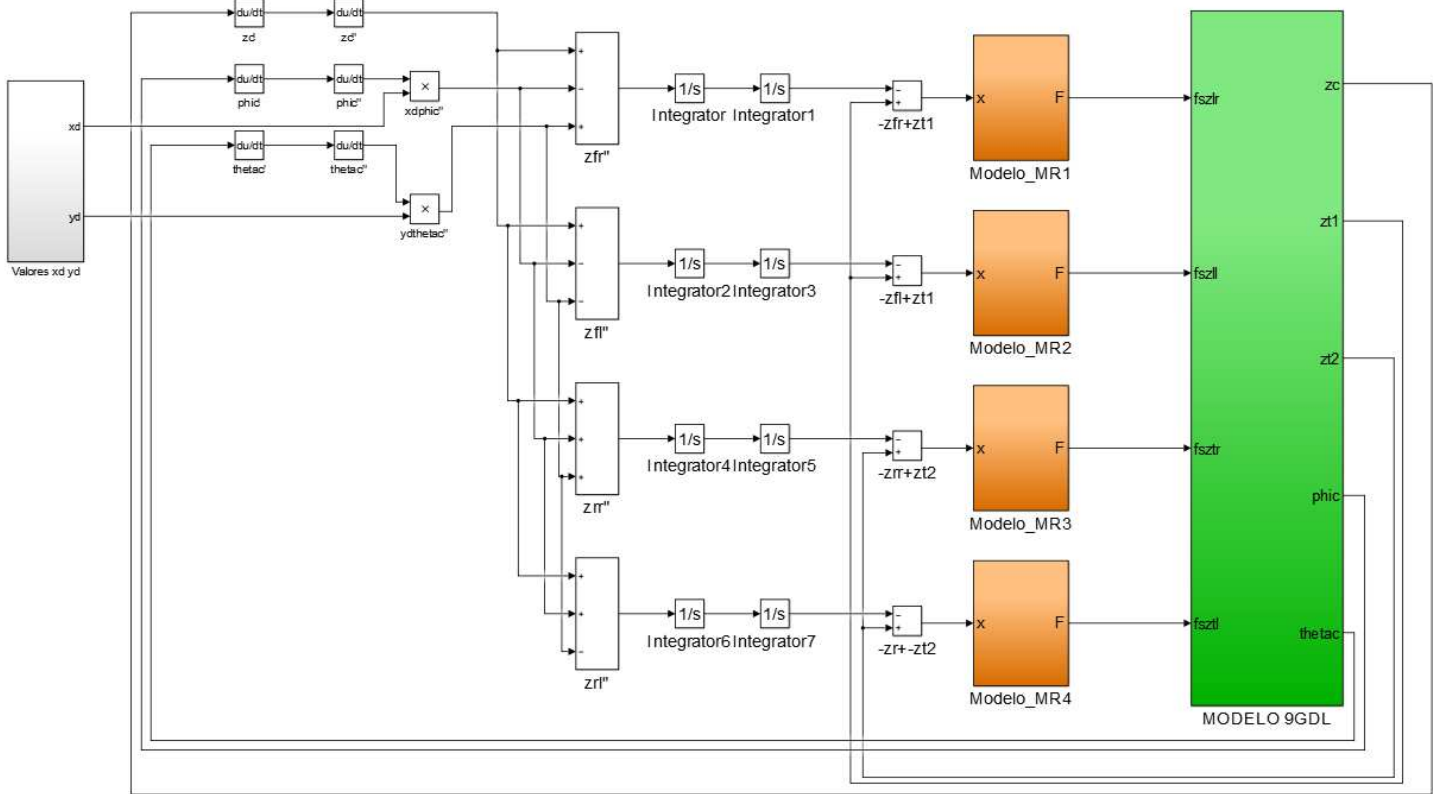


Figura 5.2. Modelo de 9 GDL en Simulink

Este modelo de 9 GDL está formado por las ecuaciones que gobiernan el sistema del apartado 5.1, y las ecuaciones complementarias del Anexo B. Sin embargo, hay que tener en cuenta las perturbaciones de la vía. Se considera que la perturbación de la vía está regida por la Ecuación 27 y separas en el tiempo para cada eje por las Ecuaciones 28, 29 y 30.

$$\begin{bmatrix} z_{1r}(t) \\ z_{1l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4A}{\pi} \left[\frac{1}{3} \cos \Omega x - \frac{1}{15} \cos 2\Omega x + \frac{1}{35} \cos 3\Omega x \right] \\ \frac{4A}{\pi} \left[\frac{1}{3} \cos \Omega x - \frac{1}{15} \cos 2\Omega x + \frac{1}{35} \cos 3\Omega x \right] \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 27})$$

con: $\Omega \left[\frac{rad}{m} \right]$ y $x = Vt$ con A [m], el valor de omega puede ser por ejemplo: $\Omega = \frac{2\pi}{L}$ con $L=25$ m, que es la separación entre ruedas.

Para los cuatro ejes la ecuación es la misma pero con el correspondiente retraso en el tiempo, es decir:

Para el eje 2 ($z_{2r}(t)$ y $z_{2l}(t)$) se tiene un retraso equivalente a la Ec. 28.

Para el eje 3 ($z_{3r}(t)$ y $z_{3l}(t)$) se tiene un retraso equivalente a la Ec. 29.

Para el eje 4 ($z_{4r}(t)$ y $z_{4l}(t)$) se tiene un retraso equivalente a la Ec. 30.

$$\tau_1 = 2b/V \quad (\text{Ec. 28})$$

$$\tau_2 = 2l/V \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\tau_3 = 2(b + l)/V \quad (\text{Ec. 30})$$

$$(con \ b = 1.25 \ m, \quad l = 9.00 \ m, \quad V = 200 \frac{Km}{h} = 55.56 \frac{m}{s})$$

quedando las ecuaciones 31, 32 y 33 para los tres puntos.

$$\begin{bmatrix} z_{2r}(t) \\ z_{2l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_1) \\ z_{1r}(t - \tau_1) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$\begin{bmatrix} z_{3r}(t) \\ z_{3l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_2) \\ z_{1r}(t - \tau_2) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\begin{bmatrix} z_{4r}(t) \\ z_{4l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_3) \\ z_{1r}(t - \tau_3) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 33})$$

Estas perturbaciones es lo que se ha llamado z_1, z_2, z_3, z_4 en el bloque azul de la Figura 5.3.

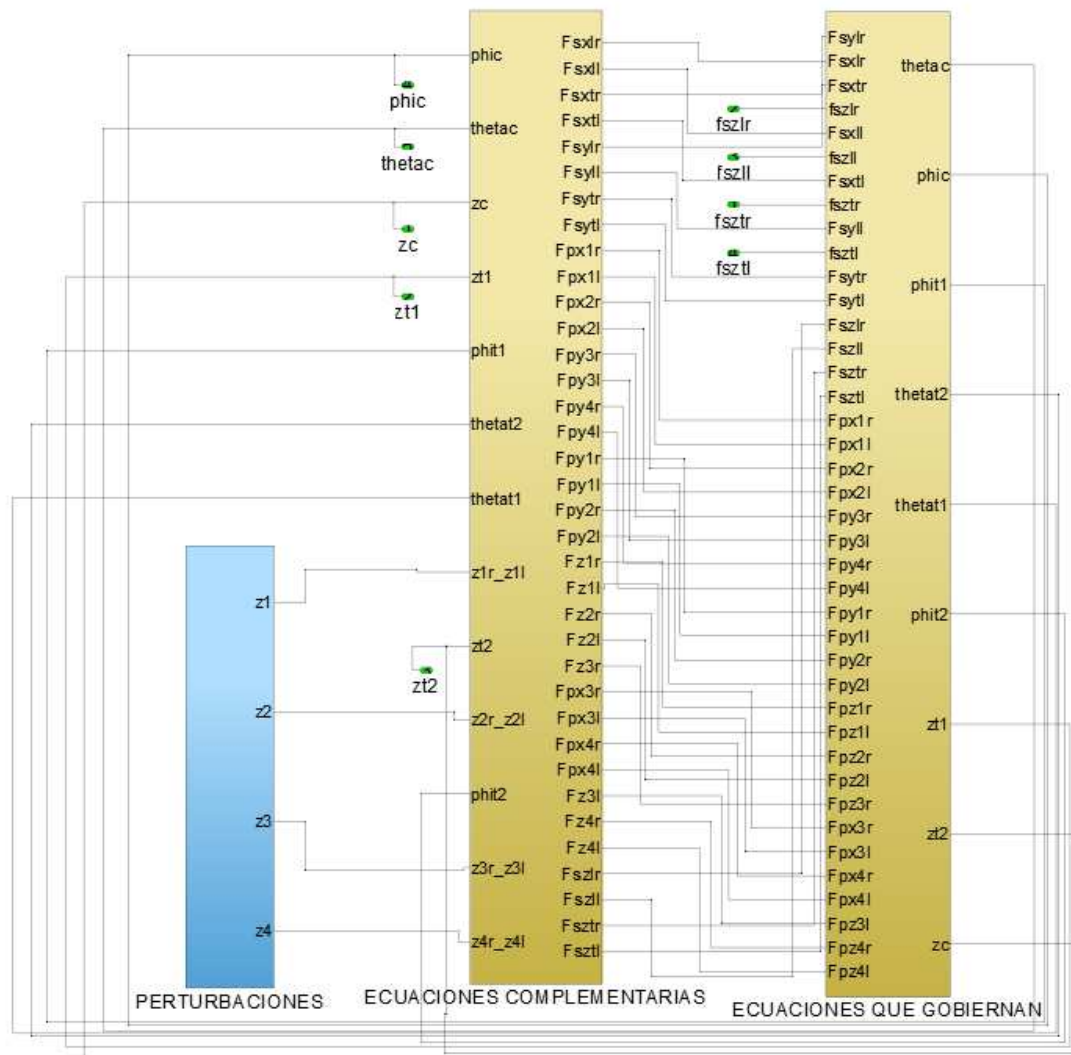


Figura 5.3. Continuación del modelo de 9 GDL en Simulink

Se han colocado pasajeros en 4 puntos distintos del vehículo para hacer diferentes mediciones, se llaman puntos del cuerpo del vehículo (puntos de pasajero) y son los descritos en las ecuaciones 34-37.

$$\ddot{z}_{fr}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c - x_d \ddot{\phi}_c + y_d \ddot{\theta}_c \quad (\text{Ec. 34})$$

$$\ddot{z}_{fl}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c - x_d \ddot{\phi}_c - y_d \ddot{\theta}_c \quad (\text{Ec. 35})$$

$$\ddot{z}_{rrr}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c + x_d \ddot{\phi}_c + y_d \ddot{\theta}_c \quad (\text{Ec. 36})$$

$$\ddot{z}_{rl}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c + x_d \ddot{\phi}_c - y_d \ddot{\theta}_c \quad (\text{Ec. 37})$$

Con $x_d = 9 \text{ m}$, $y_d = 0.75 \text{ m}$, $z_d = -0.2 \text{ m}$

El resto de ecuaciones modeladas en Simulink no están incluidas por ser su extensión demasiado grande, pero el proceso de creación es el mismo.

5.3 Resultados del modelo y conclusiones

5.3.1 Resultados

Con el modelo anterior se pueden obtener diferentes resultados tanto del vagón como de los bogies. Mediante MATLAB podemos obtener valores numéricos de los diferentes movimientos, pero es más intuitivo la visualización de gráficas. El elemento de Simulink To Workspace, nos permite enviar los valores de los movimientos como array al Workspace de MATLAB.

El movimiento vertical del vagón para diferentes valores de tensión se dibuja en la Figura 5.4. Si se toman los valores 0, 4, 6, 8, 12 Voltios de tensión los valores del movimiento vertical para el vagón serían los siguientes, con una amplitud en las ecuaciones armónicas de las perturbaciones de 0.0009 m y un valor de omega de 0.9 rad/m:

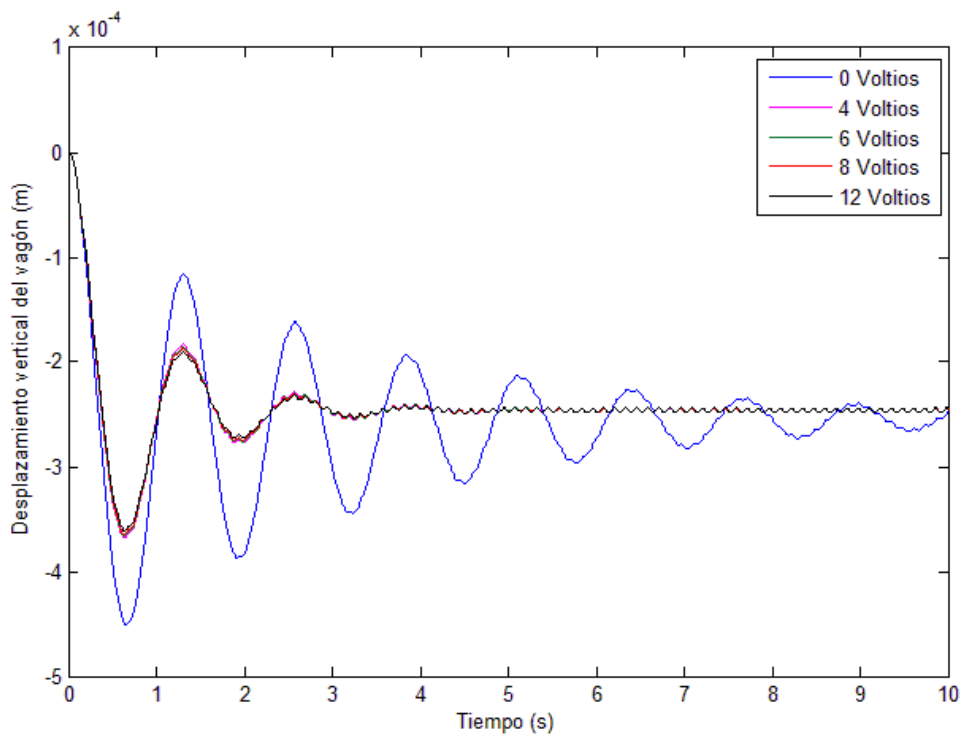


Figura 5.4. Desplazamiento vertical del vagón para 5 voltajes diferentes

Si se hace zoom en un pico de la Figura 5.4, se puede apreciar mejor la disminución del desplazamiento vertical del vagón para diferentes tensiones, estando este aumento en la Figura 5.5.

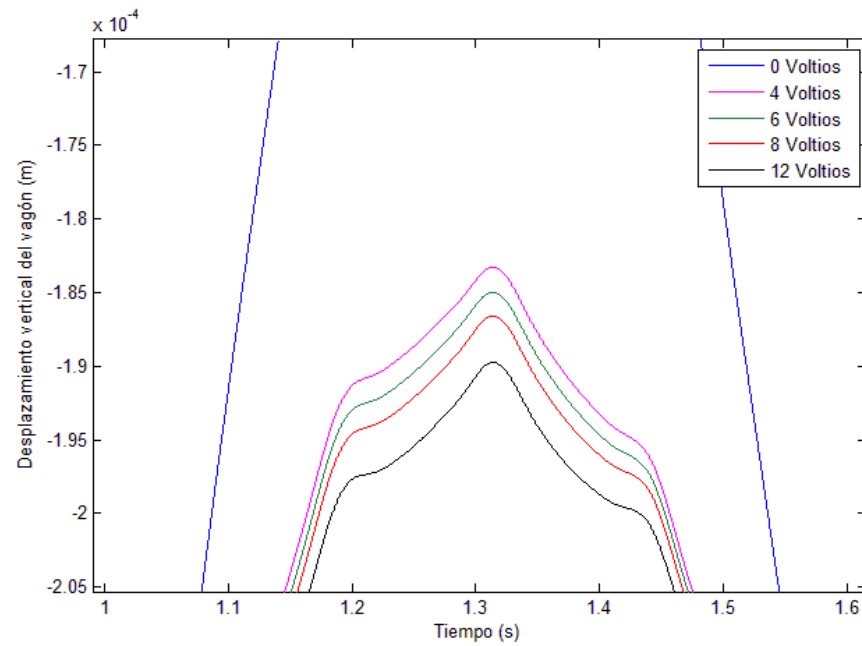


Figura 5.5. Aumento de la gráfica del desplazamiento vertical para 5 voltajes diferentes

Como se ve el movimiento va decreciendo a medida que el amortiguador actúa hasta que se va estabilizando.

También es importante conocer la aceleración vertical que sufre el vagón representada en la Figura 5.6.

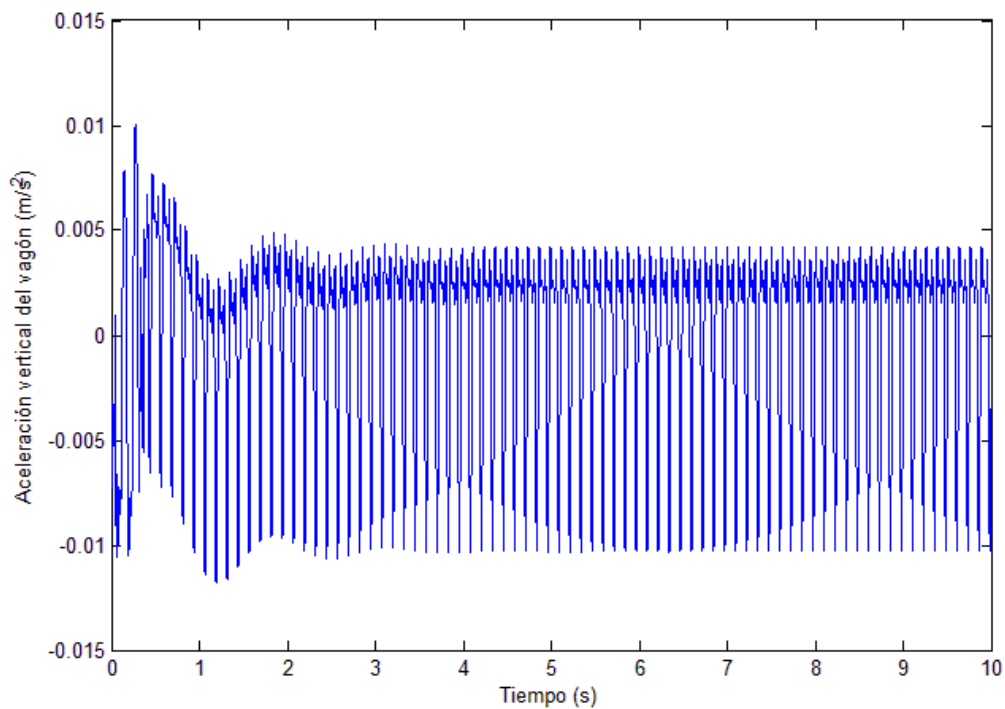


Figura 5.6. Aceleración vertical del vagón

Se puede obtener el movimiento de cabeceo φ_c y balanceo θ_c del vehículo de la misma forma que para el movimiento vertical.

Para la aceleración de la rotación del vagón en el plano longitudinal (cabeceo φ_c), se obtiene el movimiento de la Figura 5.7, para una tensión de 12 Voltios.

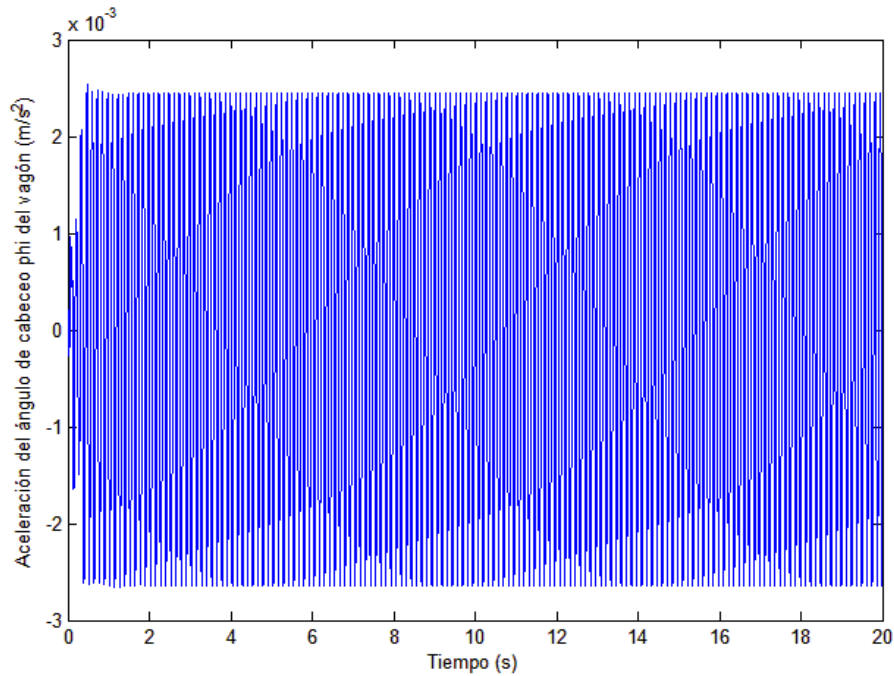


Figura 5.7. Movimiento de aceleración de cabeceo del vagón

El movimiento vertical que sufren los dos bogies (delantero y trasero) está representado en la Figura 5.8.

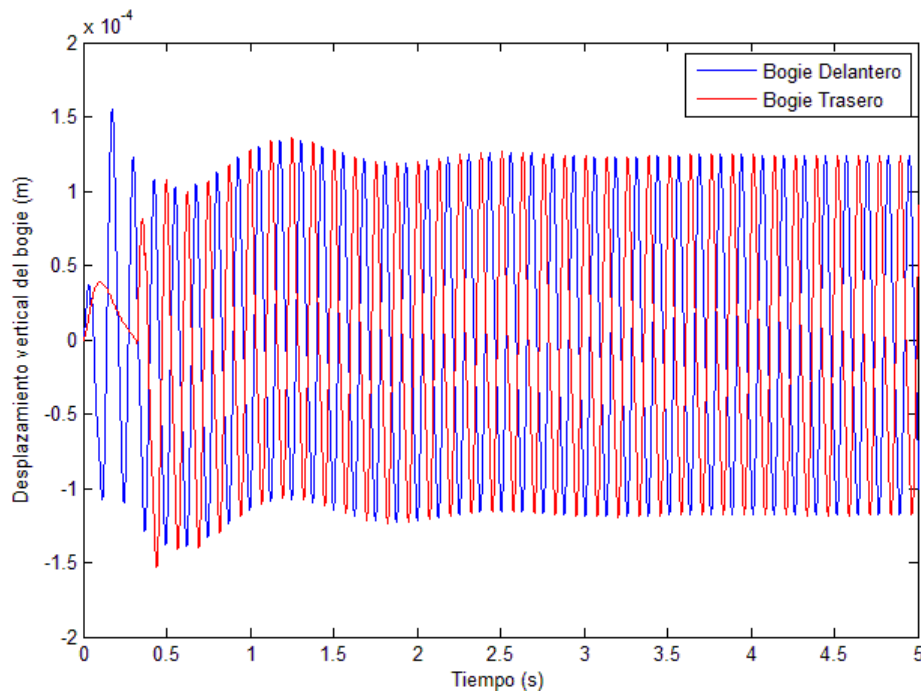


Figura 5.8. Movimiento vertical de los dos bogies

Algo interesante es conocer que aceleración sufren los pasajeros situados en cuatro puntos distintos, que se llaman (z_{fr}'' , z_{fl}'' , z_{rr}'' , z_{rl}''). Esta aceleración en los cuatro puntos está representada en la Figura 5.9.

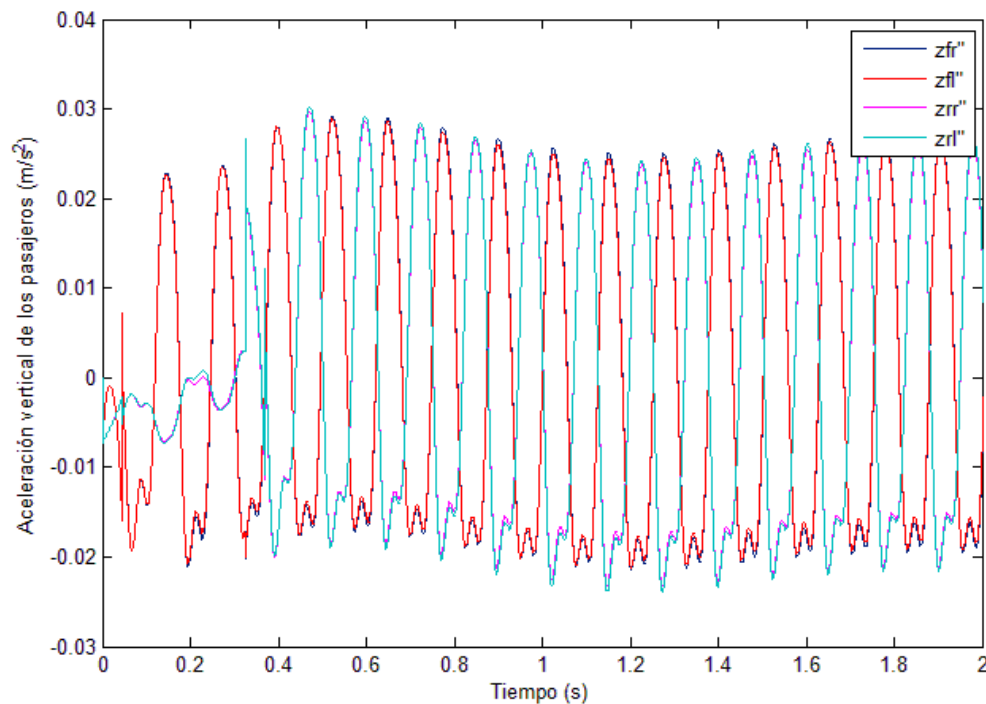


Figura 5.9. Aceleración de los pasajeros en los cuatro puntos

Estos son los resultados para una excitación concreta. Se puede cambiar esta excitación para mirar si los resultados serían diferentes, por ejemplo, si se cambia el valor de omega en las perturbaciones a 3 rad/m. La representación de la comparación del desplazamiento vertical del vagón para dos valores de omega puede verse en la Figura 5.10.

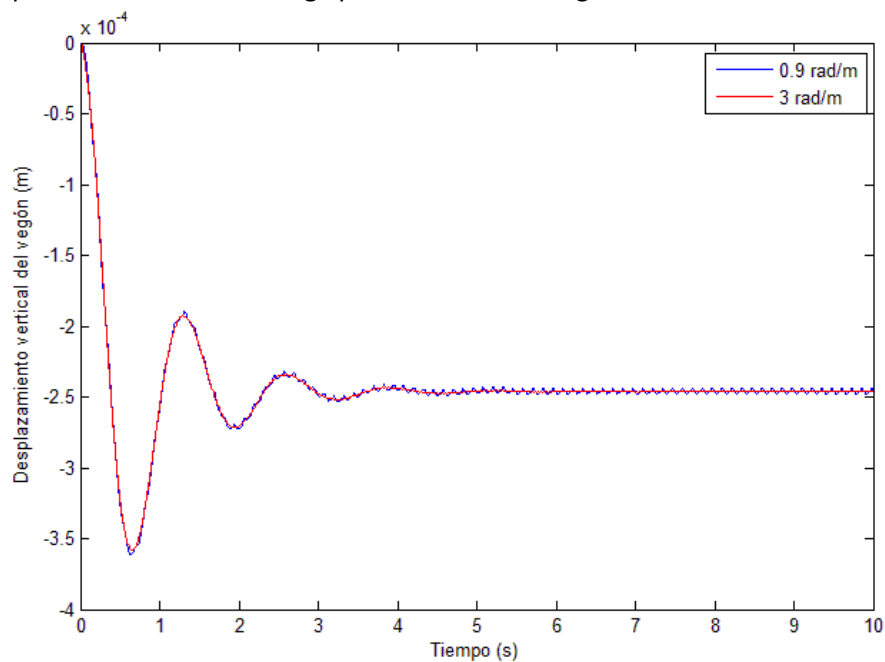


Figura 5.10. Comparativa desplazamiento vertical entre dos excitaciones

La diferencia entre poner un valor u otro, cambia simplemente el número de irregularidades que se tienen en la vía, es decir, para un valor de omega 0.9 rad/m, se tiene un menor número de perturbaciones por unidad de longitud que con 3 rad/m. Lo comprobamos:

$$\Omega = \frac{a\pi}{L} = 0.9 \rightarrow a\pi = 25 \cdot 0.9 = 22.5 \text{ rad} \sim 3.6 \text{ revoluciones}$$
$$\Omega = \frac{a\pi}{L} = 3 \rightarrow a\pi = 25 \cdot 3 = 75 \text{ rad} \sim 11.9 \text{ revoluciones}$$

Lo cual significa que en un espacio de 25 metros para un omega existen en total casi 4 perturbaciones, mientras que para un valor de omega de 3 rad/m se tienen casi 12 perturbaciones en un espacio recorrido de 25 metros.

5.3.2 Conclusiones

En este capítulo se estudia el desarrollo de un modelo de 9 GDL, mediante el programa Simulink con amortiguadores MR incorporados, las conclusiones que se pueden sacar de los resultados obtenidos se exponen a continuación.

Si se observa el comportamiento del vagón se puede decir, que en el desplazamiento vertical del vagón la gráfica tiene el comportamiento esperado para un movimiento amortiguado con excitaciones sinusoidales, va decreciendo en el tiempo hasta estabilizarse. También se ve que para todos los valores de voltaje el desplazamiento es prácticamente el mismo, siendo menor para el voltaje más alto (12 Voltios), por lo que se puede decir que para mayores valores del voltaje del amortiguador este reduce más el desplazamiento vertical del vagón, especialmente comparado con el valor en el que el amortiguador no actúa (0 voltios). Respecto a los órdenes de magnitud, se puede decir que están dentro de lo esperado, la excitación de la vía que se ha puesto es del orden de $9 \cdot 10^{-4}$ m y el valor máximo que se tiene en la gráfica es del orden de 10^{-4} .

Respecto a la aceleración vertical, puede verse que esta tiene una forma armónica, se mantienen sus valores constantes durante toda la simulación, lo que es bueno para los pasajeros, ya que no sufren aceleraciones inesperadas.

Si se observan los otros movimientos del vagón, el balanceo y el cabeceo, el cabeceo tiene una forma armónica que permanece constante, y el respecto al balanceo se puede decir que al principio presenta cierta discontinuidad que va disminuyendo con el tiempo hasta que este se estabiliza.

El movimiento de los bogies es el mismo, en los dos casos, tanto para el bogie delantero como el trasero se tiene el mismo movimiento, sólo que separados en el tiempo, algo normal dado que las perturbaciones no comienzan a la misma vez en ambos bogies.

En el caso de las aceleraciones de los pasajeros se puede ver, que prácticamente se superponen las líneas, los valores para las aceleraciones de los pasajeros de delante son prácticamente iguales ($z_{fr}'' \sim z_{fl}''$), y lo mismo ocurre para las aceleraciones de los viajeros colocados atrás, las líneas de las gráficas prácticamente se superponen ($z_{rr}'' \sim z_{rl}''$).

Se pueden realizar simulaciones, para diferentes valores de las perturbaciones. Si se varía el valor de omega, se pueden tener más o menos perturbaciones en una distancia recorrida, mientras que si se varía la amplitud, el valor del movimiento vertical también varía.

En general se puede decir, que este modelo de 9 GDL se ajusta bien a un modelo de vehículo ferroviario, y la implementación de los amortiguadores también es correcta ya que los valores de movimiento del vagón se encuentran dentro del movimiento y forma esperados.

Aunque muy útil, la herramienta Simulink, no permite visualizar el movimiento del tren. Si se quiera observar el movimiento del vehículo con estos amortiguadores incorporados, se

debería usar un modelo en 3 dimensiones del vehículo. Por este motivo, en el siguiente capítulo, se lleva a cabo un modelo de vehículo ferroviario mediante el programa Simpack. Con este programa se ve la respuesta del vehículo con el modelo de amortiguador en Simulink.

CAPÍTULO 6: Modelado del tren en Simpack

6.1 Simpack

Simpack es un software de Simulación Multi-Cuerpo (Multi-Body Simulation, MBS), que se usa para el análisis dinámico de un sistema mecánico. Permite generar y resolver modelos virtuales 3D con el fin de predecir y visualizar el movimiento, fuerzas y tensiones. Se utiliza principalmente en las siguientes industrias: automóvil, motor, ferrocarril, sector industriales, etc., pero también es aplicable a cualquier rama de ingeniería mecánica.

Se utiliza este programa, para el desarrollo de un vehículo ferroviario, en el que se pueda implementar el modelo de amortiguador desarrollado en Simulink en el capítulo 4.

El programa está dividido en una serie de módulos, para este Proyecto se usarán tres de ellos, los módulos base Pre, Solver y Post [27].

- **Módulo Pre:** permite al usuario construir un modelo desde cero. Se usa para construir el modelo de tren, comenzando por el juego de ruedas y terminando por el vagón. Una imagen de este módulo puede verse en la Figura 6.1.

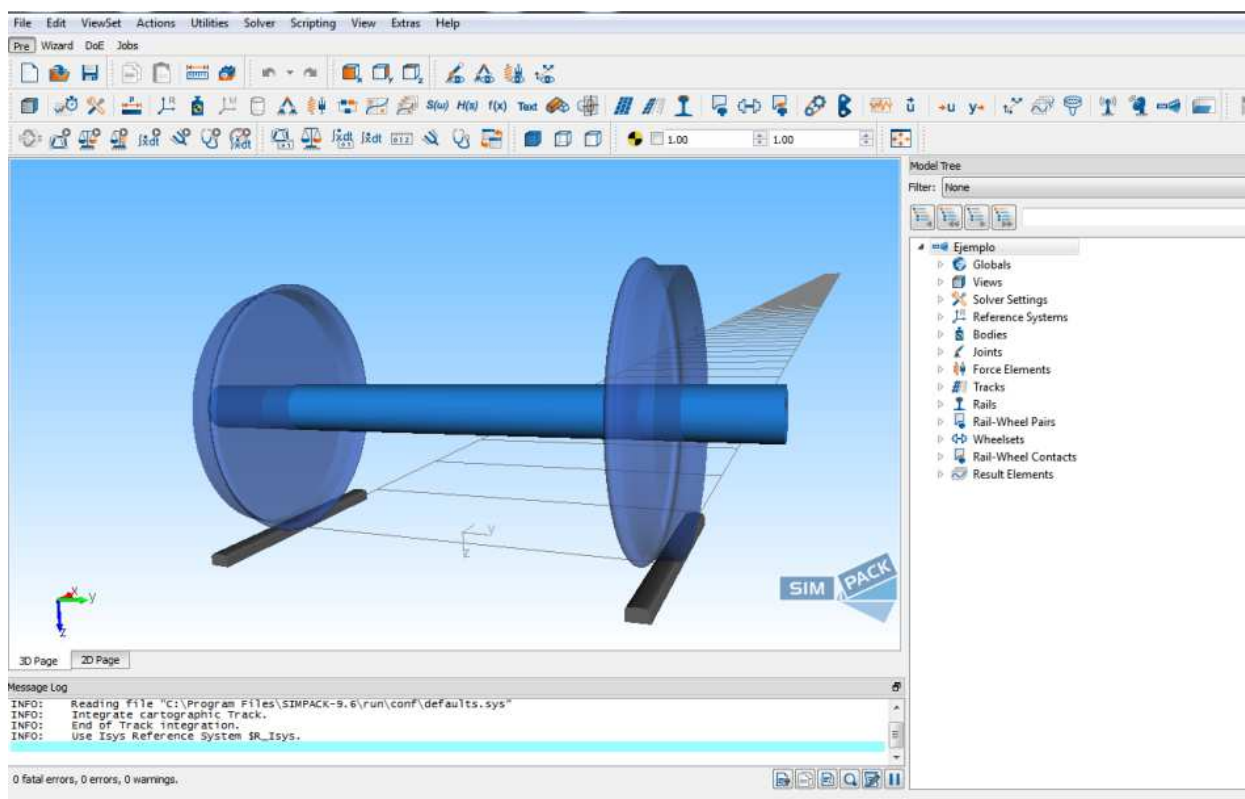


Figura 6.1. Módulo Pre de Simpack

- **Módulo Solver:** permite al usuario llevar a cabo análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia. En este caso sirve, para obtener un archivo que es leído por el Módulo Post.
- **Módulo Post:** permite la visualización de los resultados en gráficos 2D, 3D o animaciones, existen filtros para el análisis de resultados y las plantillas pueden ser

CAPÍTULO 6: Modelado del tren en Simpack

definidas por el usuario, lo que permite un fácil análisis de resultados. Se utiliza para el análisis de resultados. Una imagen de este módulo es la Figura 6.2.

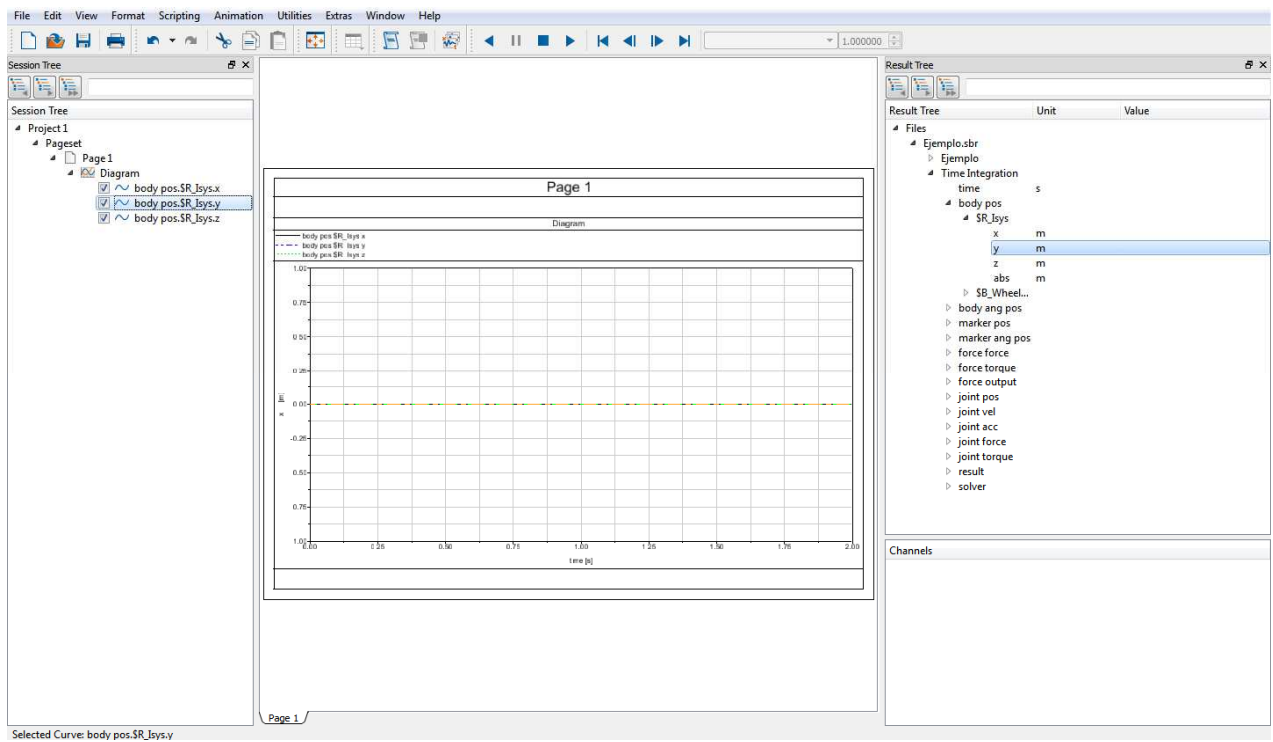


Figura 6.2. Módulo Post de Simpack

6.2 Modelo del tren

En este apartado se ve cómo es el modelo de tren en Simpack. Dado que una explicación de su construcción puede resultar excesivamente larga para la lectura del Proyecto, los detalles de su construcción están adjuntos en el Anexo A.

No obstante si es interesante ver algunas partes del tren, para entender la colocación de los amortiguadores y el funcionamiento de los mismos.

En la Figura 6.3 se puede ver cómo es el modelo del *bogie* que se utiliza, formado por dos juegos de *ruedas*, lo que sería el *bastidor* y el cabezal fijo para su unión con el vehículo, al que llamaremos *dummy*.

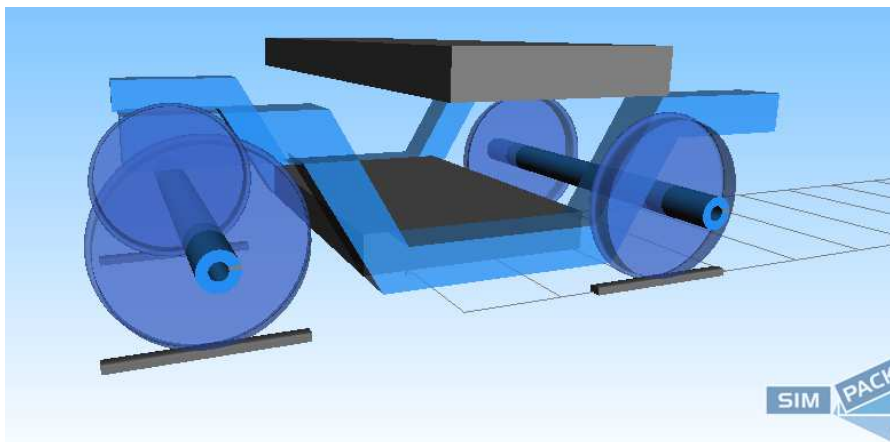


Figura 6.3. Bogie del vehículo

En este bogie se encuentran situadas la *suspensión primaria* (muelles y amortiguadores verticales) y *secundaria* (muelles verticales y amortiguadores verticales y laterales). La suspensión se construye mediante unos elementos llamados *Force Elements*, se debe crear un elemento para cada muelle y cada amortiguador entre dos puntos denominados *Markers*. En la Figura 6.4 se muestran los Markers que se tienen en el bogie y el dummy.

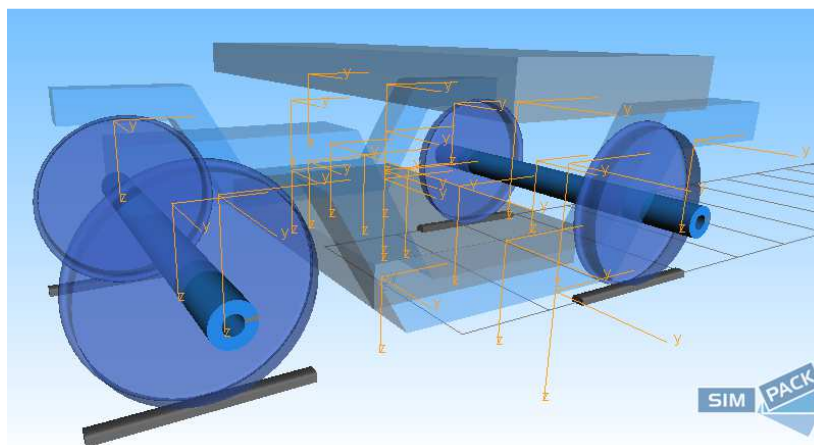


Figura 6.4. Markers del bogie y dummy

En la suspensión primaria, se pueden ver en la Figura 6.5, los 4 muelles y amortiguadores verticales.

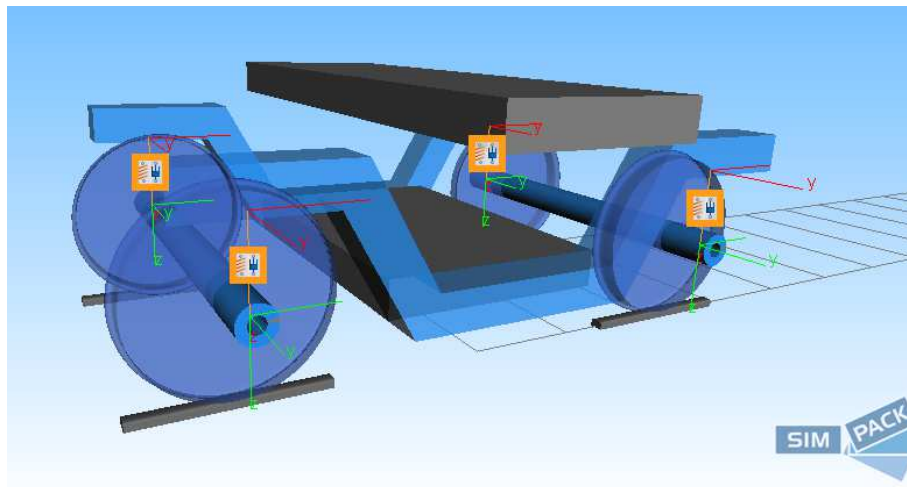


Figura 6.5. Suspensión primaria en Simpack

En la suspensión secundaria se tienen dos muelles verticales, dos amortiguadores verticales y dos laterales, tal y como están en la Figura 6.6.

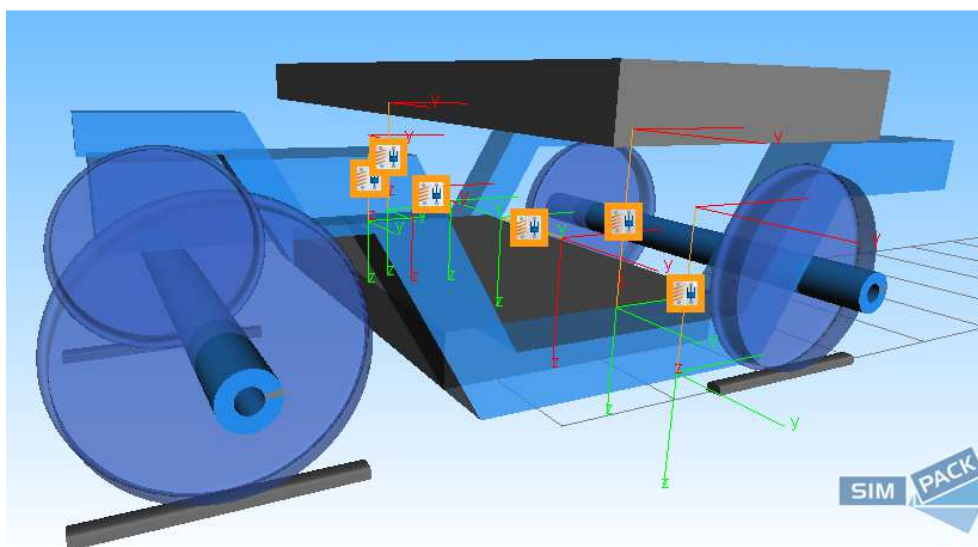


Figura 6.6. Suspensión secundaria en Simpack

En este Proyecto, los amortiguadores magnetoreológicos son los dos verticales de la suspensión secundaria, es decir los que se muestran en la Figura 6.7.

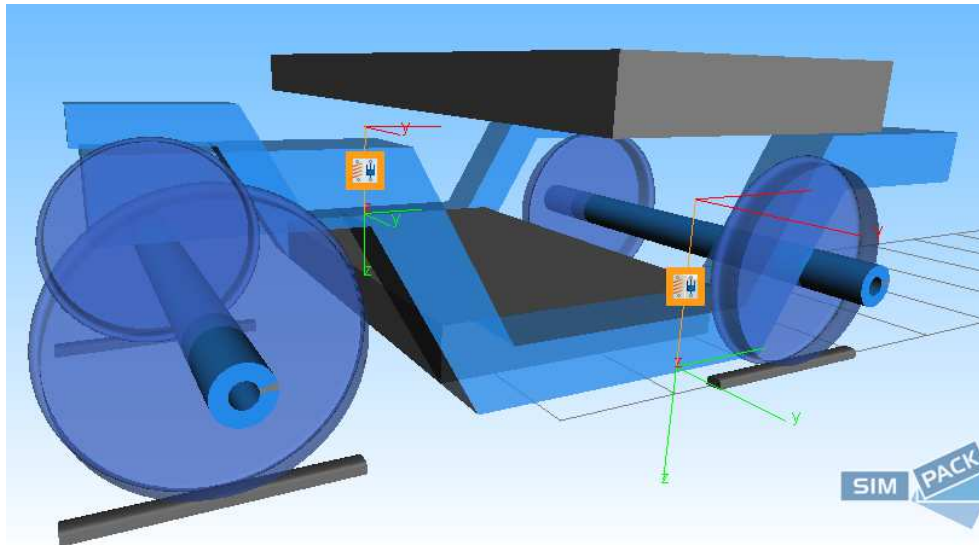


Figura 6.7. Amortiguadores MR en Simpack

Una vez se tiene el bogie construido, únicamente hay que duplicarlo, para tener un bogie delantero y otro trasero, y crear el vagón con sus uniones pertinentes para poder operar con él.

El vehículo una vez construido en su totalidad queda como se ve en la Figura 6.8.

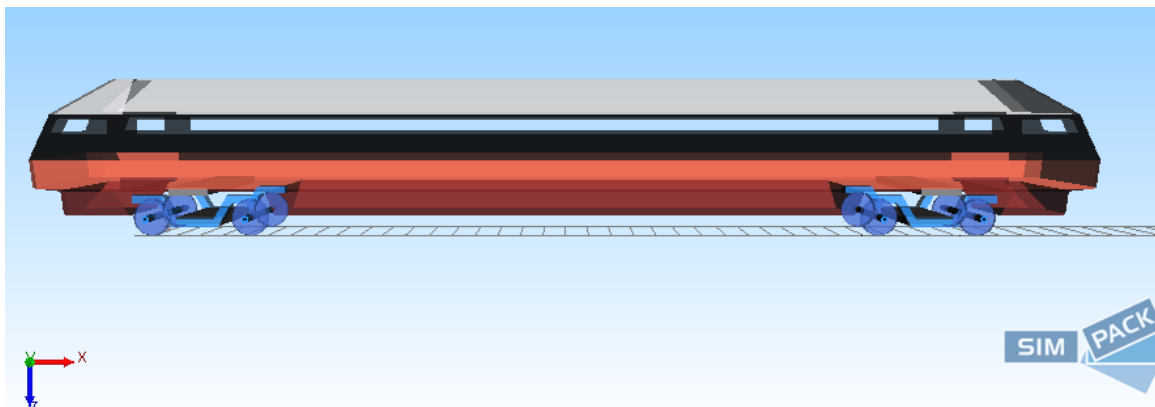


Figura 6.8. Modelo de tren completo en Simpack

Existen además otros elementos para completar las suspensiones y el vehículo como son la barra antitorsión el bumpstop, todos estos elementos están detallados en el Anexo A.

Es importante saber, que para poder utilizar el modelo del amortiguador en Simulink del capítulo 4, se debe crear antes un red neuronal del mismo, para después implementarlo en el modelo de vehículo ferroviario de Simpack. Por este motivo, en el siguiente capítulo 7, se ve que es una red neuronal, y la construcción de la misma.

CAPÍTULO 7: Redes Neuronales

7.1 Redes neuronales

Consideradas como una rama de la inteligencia artificial, en las que el conocimiento se incorpora con el aprendizaje a partir de ejemplos, las redes neuronales artificiales o RNA pretenden imitar (a pequeña escala) las neuronas del cerebro humano. Estas RNA se aplican al reconocimiento de patrones, por lo cual se usan para modelar y efectuar predicciones en sistemas complejos. Todo esto es lo que se va a estudiar en este apartado, qué son las RN y para qué sirven, y después en el apartado 7.2 se ve cómo crear una red neuronal en Simulink y los resultados de la red que se ha creado [22].

Podemos definir entonces una **red neuronal artificial (RNA)** como un procesador distribuido en paralelo de forma masiva, que tiene una tendencia natural para almacenar conocimiento de forma experimental, haciéndolo disponible para usarlo [22].

Se puede decir que el cerebro humano, se corresponde con un sistema altamente complejo, no-lineal y paralelo, por lo que pueden realizar muchas operaciones simultáneamente, esto es lo que se quiere imitar [23].

Las RNA, también llamadas redes neuronales o neuroredes, se caracterizan principalmente por:

- 1) Tienen una inclinación natural a adquirir conocimiento a través de la experiencia.
- 2) El conocimiento se almacena en el peso relativo de las conexiones interneuronales.
- 3) Poseen gran plasticidad y adaptabilidad, pueden cambiar dinámicamente con el medio.
- 4) Tienen alto nivel de tolerancia a fallas.
- 5) Comportamiento altamente no-lineal, por lo que pueden procesar información de otros fenómenos no-lineales [23].

Ya que lo que se desea es obtener una imitación del cerebro humano debemos conocer algunos conceptos básicos de neurobiología, en concreto de las neuronas. Una neurona posee distintas partes, aunque las dos principales son dendritas y axón. La estructura de la neurona puede verse en la Figura 7.1.

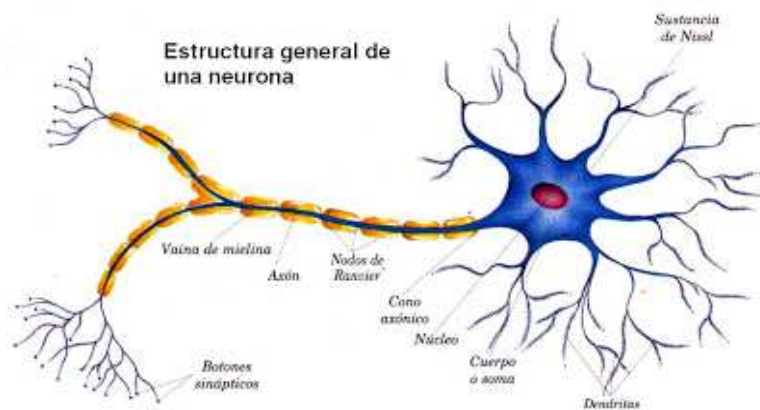


Figura 7.1. Estructura general de una neurona[24]

La mayoría de las neuronas codifican sus salidas como breves pulsos periódicos (llamados potenciales de acción), que se originan cercanos al soma de la célula propagándose a través del axón. Después, este pulso llega a la sinapsis y luego a las dendritas de la neurona siguiente. Cabe indicar que una sinapsis es una interconexión entre dos neuronas, donde el botón sináptico es el término del axón de una neurona pre-sináptica y la dendrita correspondiente de la neurona post-sináptica, este salto puede verse en la Figura 7.2 [23].

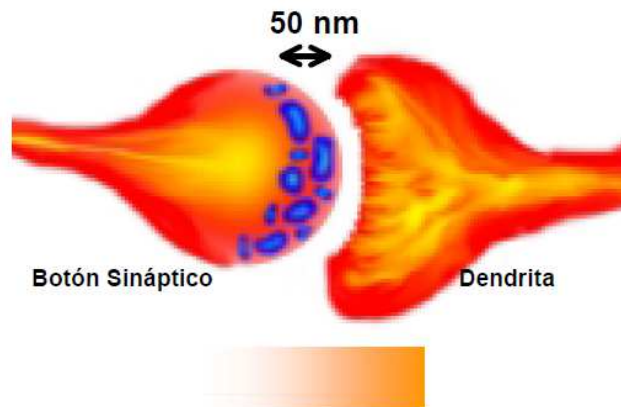


Figura 7.2. Salto sináptico

Si observamos ahora el esquema de una RNA de la Figura 7.3, donde la neurona de interés es la y_j , las n neuronas x_i envían señales de entradas. Los valores w_{ji} serían los pesos sinápticos de las dendritas de y_j .

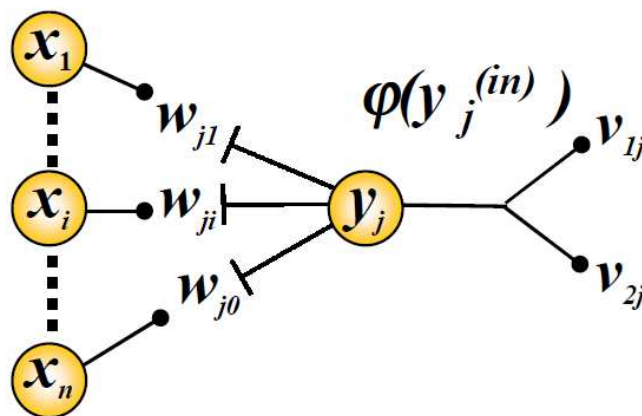


Figura 7.3. Esquema de Neurona

Si se compara entonces una neurona biológica, con una artificial, se pueden observar distintas similitudes entre ambas, se tienen dendritas (entradas), sinapsis (pesos) axón (salidas) en ambas neuronas.

La distribución de la red se realiza formando niveles o capas, teniendo estas capas un número determinado de neuronas. Dependiendo de la situación dentro de la red se pueden distinguir 3 tipos de capas:

1. *De entrada:* esta capa recibe la información de las fuentes externas a la red.
2. *Ocultas:* su situación es interna a la red no teniendo contacto con el exterior. El número de capas ocultas varía de cero a un número elevado. Las neuronas en las capas ocultas pueden estar interconectadas de diferentes maneras, esto determina las diferentes topologías de redes neuronales.
3. *De salida:* por ella sale la información al exterior.

En la Figura 7.4 se puede ver un ejemplo de estructura multicapa, donde cada nodo sólo conecta con neuronas de nivel superior. Hay más conexiones que neuronas en sí, se dice que una red está totalmente conectada si todas las salidas de un nivel llegan a todos los nodos del siguiente nivel[25].

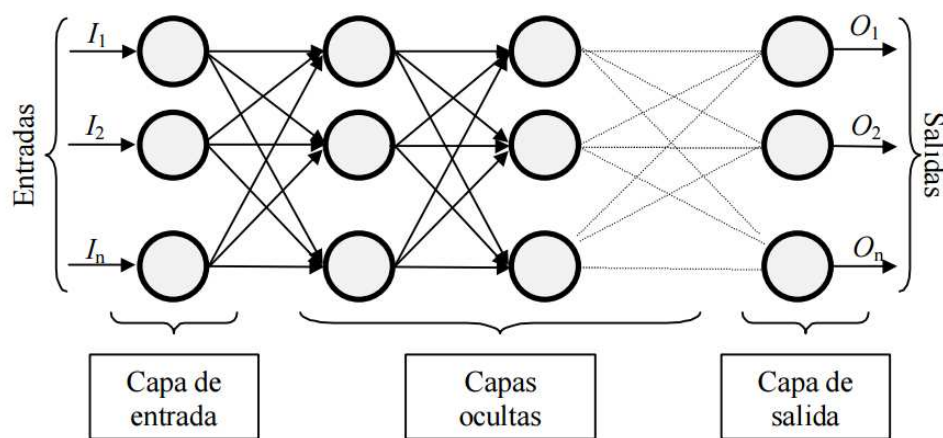


Figura 7.4. Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada

Cuando se utiliza una red neuronal para la toma de decisiones, la salida de la red es directa o indirectamente la solución al problema. En la Figura 7.5 se muestra como sería el proceso de decisión [25].

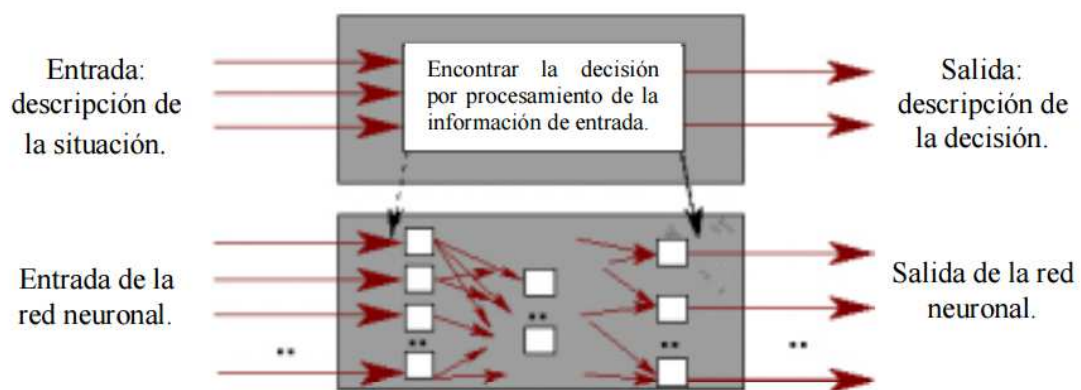


Figura 7.5. Esquema del proceso de decisión

Ya se ha dicho que una RNA adquiere conocimiento, debe aprender a calcular la salida correcta para entrada, luego el objetivo es lograr una salida. El aprendizaje es la clave de la plasticidad de una red neuronal, y es el proceso por el que se adaptan las sinapsis, para que la red responda de un modo diferente a los estímulos externos.

La topología de una red no puede cambiar mientras que los pesos de cada conexión si pueden cambiar, por lo que el aprendizaje de una red consiste en la adaptación de estos pesos según la información. Por lo tanto se puede decir que una red ha aprendido (el proceso termina), cuando los valores de los pesos son estables.

7.2 Red Neuronal en Simulink

Para poder implementar la red neuronal en el vehículo creado anteriormente, se deben seguir los siguiente pasos:

1. Obtención de los valores de la red.
2. Creación de la red con comando `nnstart`.
3. Creación del archivo `.dll` con comando `mex -setup`

7.2.1. Obtención de los valores de la red

Para crear una red neuronal se necesita una gran cantidad de valores de entrada y salida, para que la red aprenda. En este caso, se utiliza como entrada una senoidal que actúa como valores de entrada de velocidad, y como salida los valores de la fuerza del amortiguador. Para obtener estos valores únicamente es necesario, correr el modelo de Simulink, y enviar los valores de entrada y salida al Workspace de Matlab..

Conviene observar, que en el de modelo de amortiguador puede ponerse la velocidad como valor de entrada simplemente poniendo una integral después para que la entrada al modelo sea la posición.

Para cubrir el aprendizaje del programa se obtendrán valores para 3 amplitudes diferentes de la función de entrada, así como 5 valores del voltaje del amortiguador (ver Tabla 7.1)

Tabla 7.1. Valores de amplitud y voltaje para la red neuronal

Amplitud	Voltaje
0.3	0
	4
	6
	8
	12
0.5	0
	4
	6
	8
	12
0.7	0
	4
	6
	8
	12

7.2.2. Creación de la red con comando nnstart.

Para realizar la red neuronal en Simulink del modelo de amortiguador, se utiliza el comando `nnstart` en MATLAB, explicado a continuación [26].

De todos los modelos posibles de red neuronal que MATLAB nos da a elegir, se selecciona el de entrada-salida, ya que es el más adecuado y sencillo de obtener para el modelo. Este esquema puede verse en la Figura 7.6.

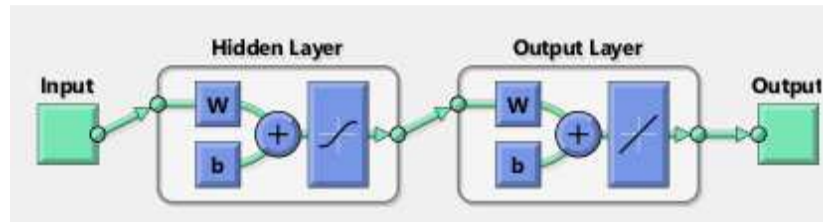


Figura 7.6. Esquema de la red neuronal usada en MATLAB

Para la creación de esta red, se deben seleccionar cuál es la entrada y cuál la salida, el número de capas ocultas que ayuda en la creación de la red, y el programa ya crea la red. Después de varias iteraciones en este caso 21 con el esquema de la Figura 7.7.

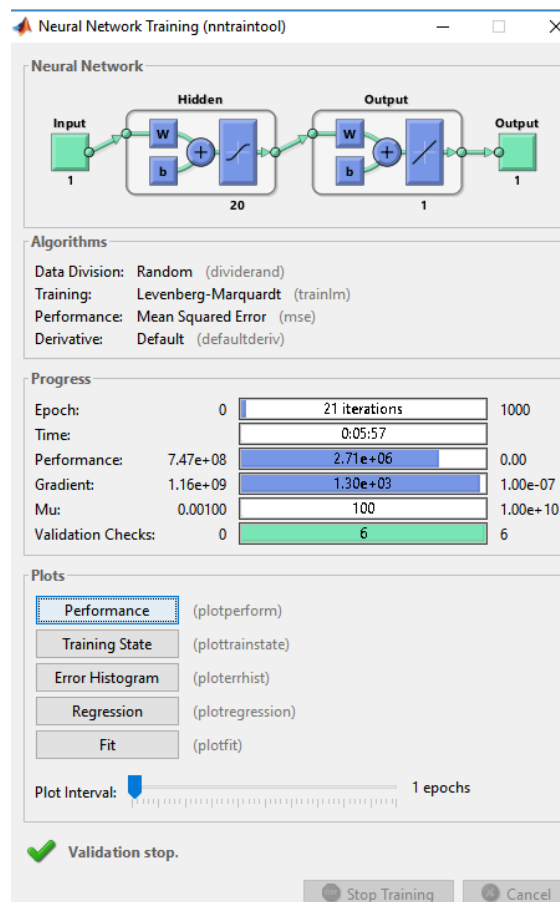


Figura 7.7. Entrenamiento de la red neuronal

Finalmente el esquema en Simulink de la red final queda como en la Figura 7.8.

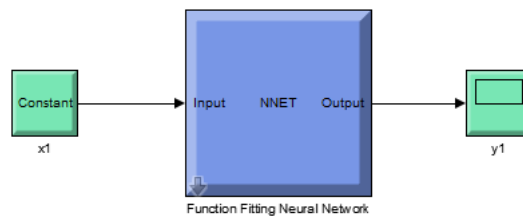


Figura 7.8. Modelo de red neuronal en Simulink

Existen muchas posibilidades en MATLAB de creación y de obtención de resultados de redes neuronales, pero no se entra en ello ya que sería algo extenso para el este Proyecto, y no aportaría nada, ya que únicamente se necesita la red para poder utilizar el programa Simpack.

7.2.3. Creación del archivo .dll con comando mex -setup

Para la creación del archivo compatible con Simpack (.dll), se debe adecuar primero el esquema de la red para su implementación en el modelo de tren, es decir, adecuar la entrada correspondiente al modelo de Bouc-Wen mejorado. En este modelo, la entrada es la diferencia entre el movimiento del bogie menos el movimiento del vagón, que en este modelo de tren corresponde al dummy. Es decir, se deben poner dos entradas para la red neuronal que luego se resten, más un valor de salida que será la fuerza del amortiguador. El esquema de la red está en la Figura 7.9.

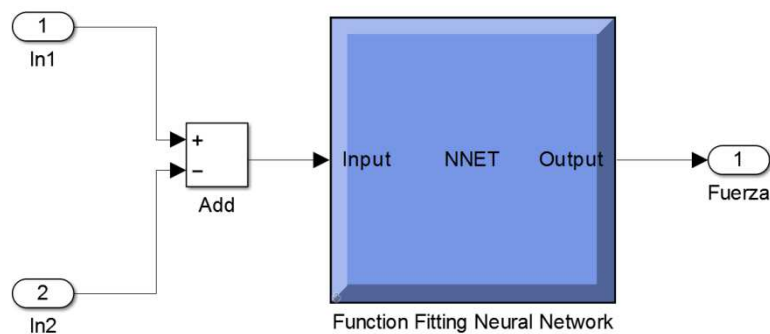


Figura 7.9. Esquema de red para creación de archivo.dll

Para crear el archivo a partir de la red, se usa el comando `mex -setup` en MATLAB. Con este comando, se da la opción de elegir un compilador para la creación del archivo, y después de ello se debe configurar los parámetros del modelo.

Para generar el modelo, se pueden utilizar diferentes métodos de integración, en este caso se utiliza el método de Euler (`ode1(Euler)`), además de utilizar como sistema de archivo de destino (System target file), `matsim.tlc` ya que este es el sistema que utiliza Simpack para unir sensores con la fuerza correspondiente (ver apartado 7.2.4), todas estas opciones pueden cambiarse en el Configuration Parameters del archivo Simulink.

Una vez ya está todo preparado, con la opción Build que ofrece Simulink, se obtiene el archivo para poder utilizarlo en el programa Simpack.

7.2.4. Implementación en el programa Simpack

Para poder obtener diferentes valores de entrada de la red neuronal, se deben utilizar una serie de sensores que ayudan a medir los valores que se deseen, además de un elemento MatSIM que da la fuerza de salida calculada con la red neuronal. El esquema que sigue el bucle de control es el siguiente [27]:



Este caso tiene 4 amortiguadores MR verticales, se deben poner suficientes sensores para medir cada magnitud, es decir, se ponen dos sensores para cada amortiguador para medir la diferencia entre el bogie y el dummy, y un elemento control MatSIM por cada amortiguador.

Existen diferentes tipos de sensores en Simpack, se va a utilizar el sensor 165, que es un sensor de medición cinemática, que permite medir la velocidad entre dos puntos. Para este estudio, se necesitan dos, uno que mida hasta el bogie (1), y otro que mida hasta el dummy (2). En total necesitamos los sensores y controladores MatSIM de la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Desglose de sensores y elementos de control en Simpack

Amortiguador	Sensor 165	MatSIM
Amortiguador delantero derecho	Delantero_derecho_1	Delantero_derecho
	Delantero_derecho_2	
Amortiguador delantero izquierdo	Delantero_izquierdo_1	Delantero_izquierdo
	Delantero_izquierdo_2	
Amortiguador trasero derecho	Trasero_derecho_1	Trasero_derecho
	Trasero_derecho_2	
Amortiguador trasero izquierdo	Trasero_izquierdo_1	Trasero_izquierdo
	Trasero_izquierdo_2	

Si se mira más en detalle cómo son estos sensores 165 dentro de Simpack, serían los mostrados en la Figura 7.10.

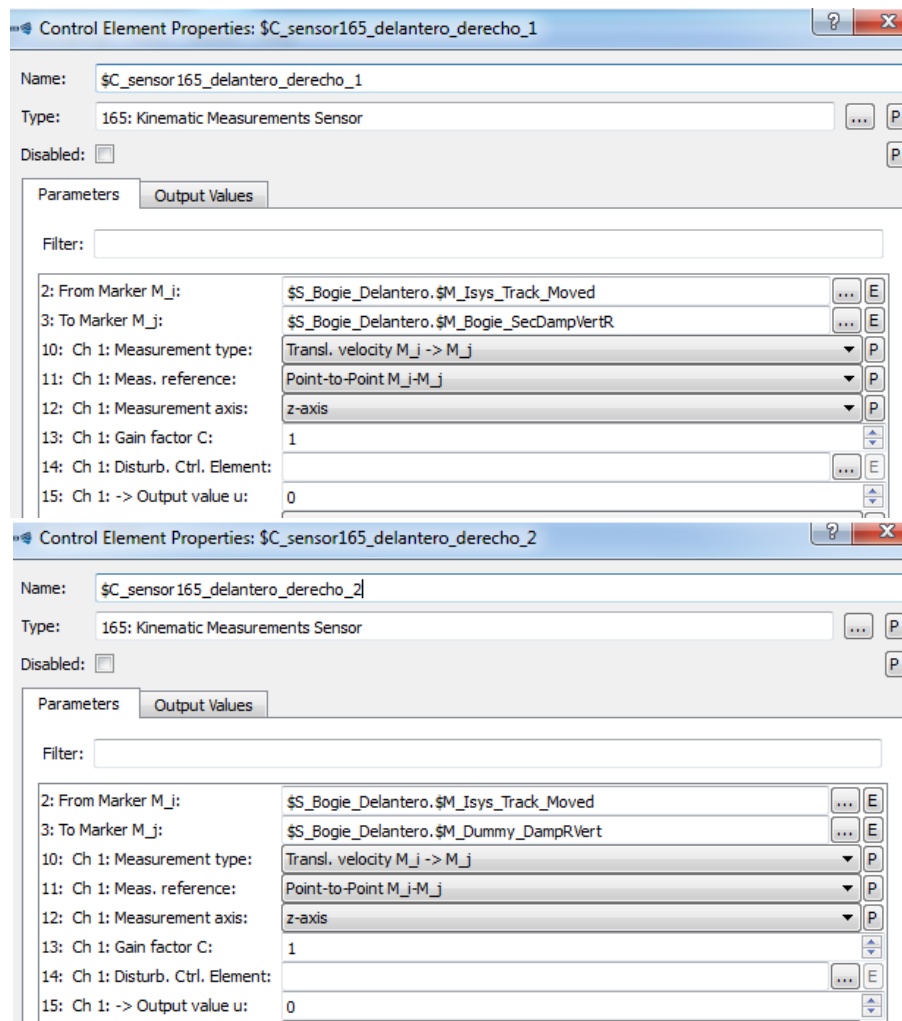


Figura 7.10. Valores de entrada de los sensores

Conviene conocer además dónde están situados esos marcadores en el bogie. Para el marcador que se utiliza cómo suelo usamos el marcador: `M_Isys_Track_Moved` situado donde se ve en la siguiente Figura 7.11.

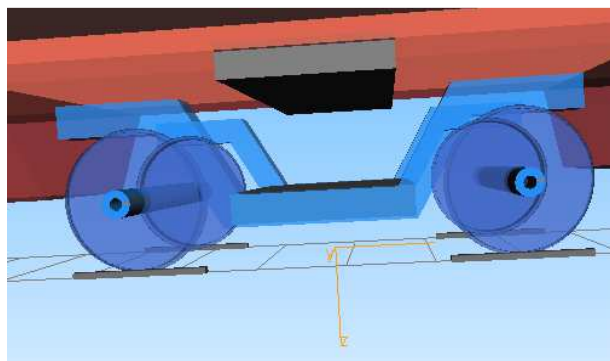


Figura 7.11. Posición del marcador del suelo

Los otros dos marcadores que se tienen, son el marcador para medir el bogie (`M_Bogie_SecDampVertR`) y el marcador para medir hasta el final del amortiguador, su punto

más cerca del dummy (M_Dummy_DampRVert), ambos situados respectivamente en el marcador naranja de la Figura 7.12.

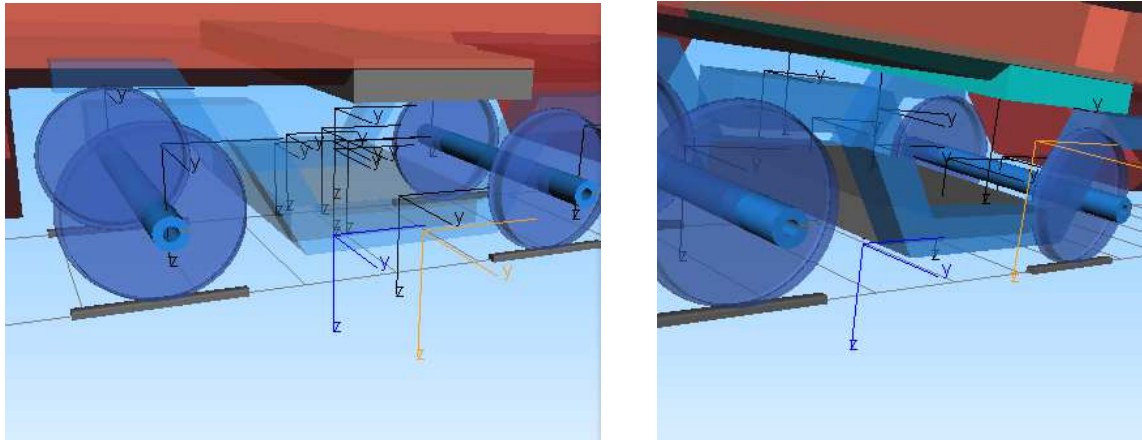


Figura 7.12. Posiciones de los marcadores del bogie y del dummy

Para el cálculo de la fuerza de salida, se utiliza el elemento control MatSIM (ver Figura 7.13) con los dos sensores 165 ya descritos como entradas, y como modelo para el cálculo la red neuronal creada (llamada en la figura 7.13 redneuronalvelocidad).

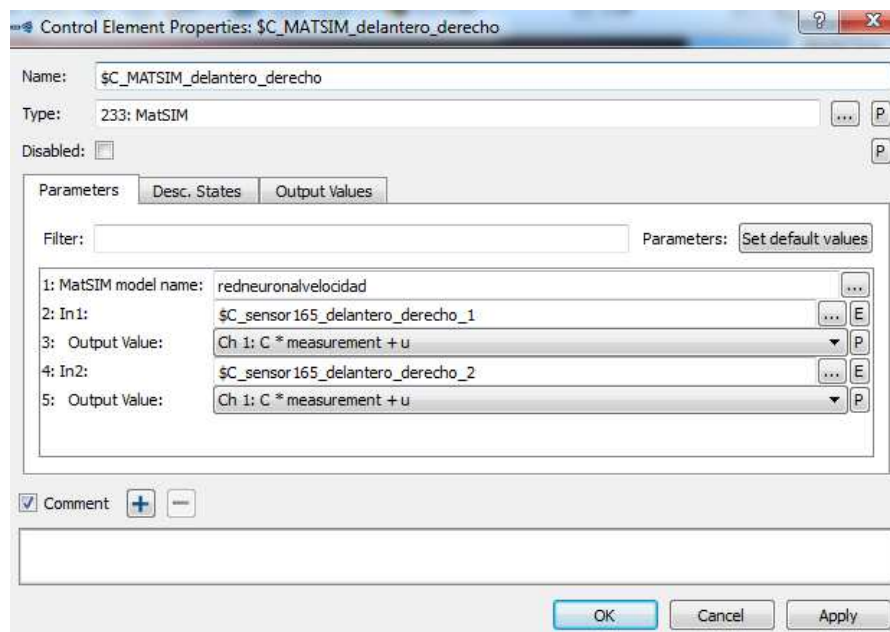


Figura 7.13. Valores de entrada del elemento de control MatSIM

Una vez hecho esto, el vehículo ya está listo para hacer los estudios que se quieran, no obstante para obtener resultados también debemos dar una excitación a la vía ferroviaria, y para ello utilizando una función armónica de Simpack.

CAPÍTULO 8: Resultados y conclusiones

8.1 Resultados

Mediante el modelo descrito en el capítulo anterior, se procede a realizar diferentes pruebas para saber cómo reacciona este modelo de amortiguador MR en un vehículo ferroviario modelado en Simpack.

En los siguientes estudios vamos a utilizar una excitación armónica en la vía de amplitud 0.0005 y una frecuencia omega de valor 1, teniendo la función la siguiente forma frente a la distancia recorrida de la Figura 8.1, además de una velocidad de 200 Km/h.

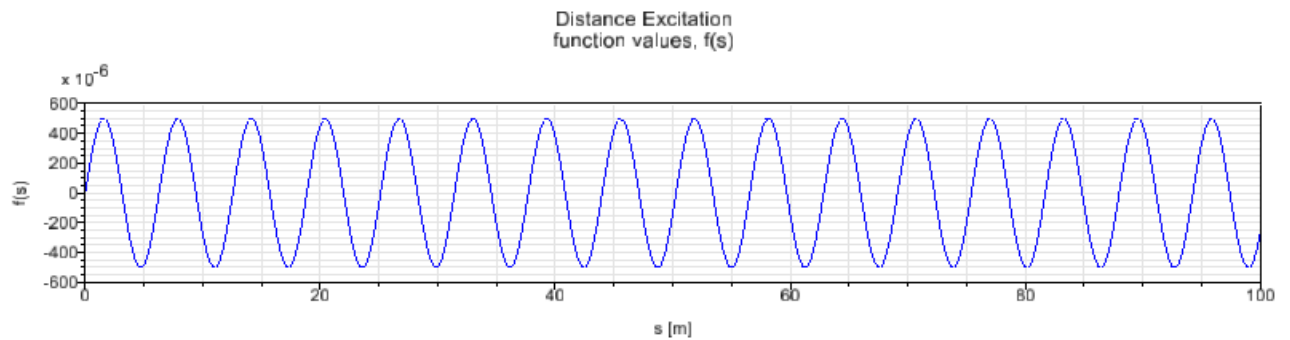


Figura 8.1. Función de excitación de la vía

Una vez conocida esta excitación, se pueden obtener valores de posición velocidad aceleración, etc.

Se observan primero las fuerzas de los cuatro amortiguadores, obtenidos con el elemento de control MatSIM. Estas cuatro fuerzas están en la Figura 8.2.

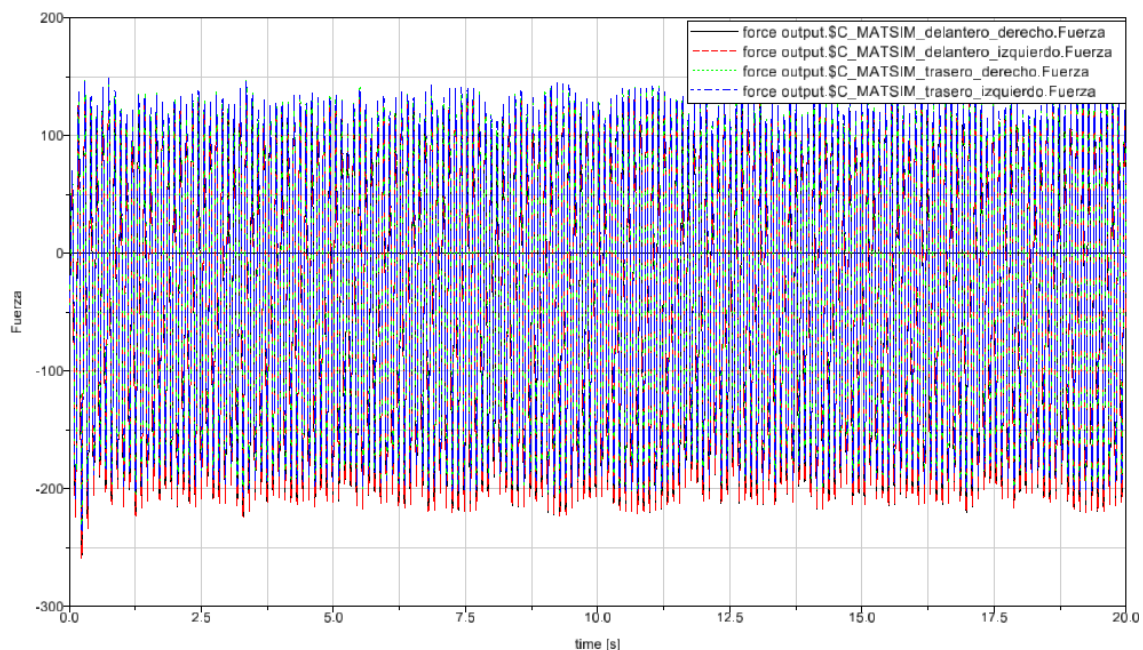


Figura 8.2. Valores de salida de las 4 fuerzas del amortiguador

Es importante saber el movimiento que sufre el vagón, ya que es donde van a ir los pasajeros, se puede ver el movimiento total del vehículo o los valores del Joint del vagón. El desplazamiento en dirección vertical del cuerpo del vagón en 20 segundos es el mostrado en la Figura 8.3.

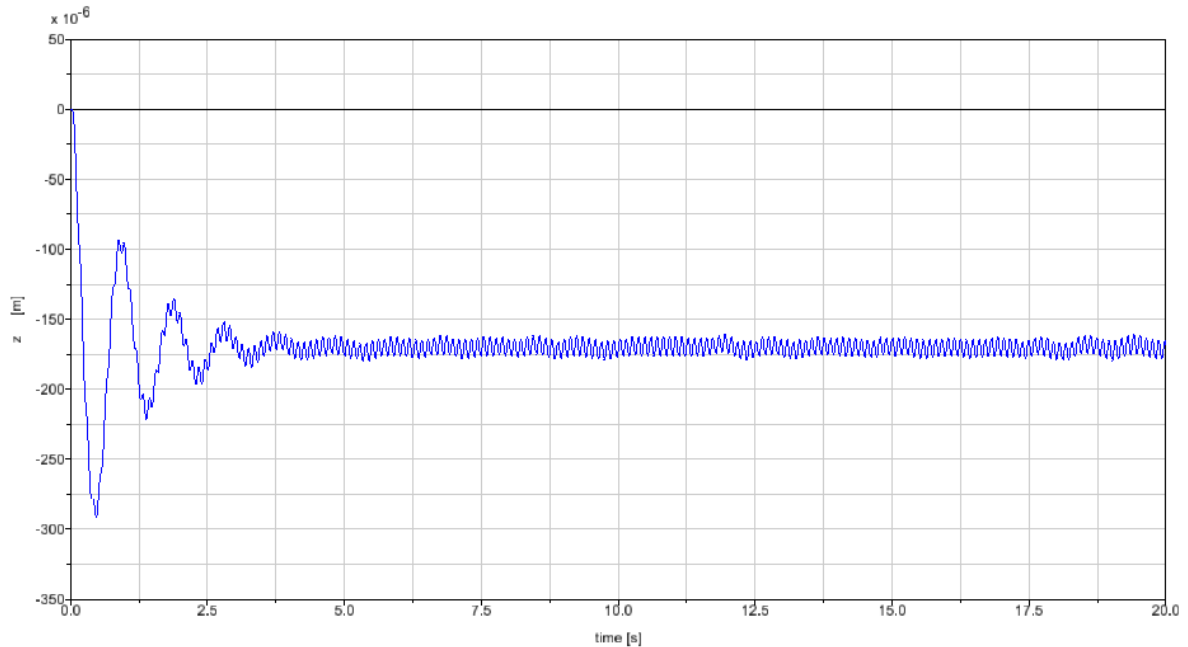


Figura 8.3. Desplazamiento vertical del vagón

Y su aceleración vertical en 20 segundos es la gráfica mostrada en la Figura 8.4.

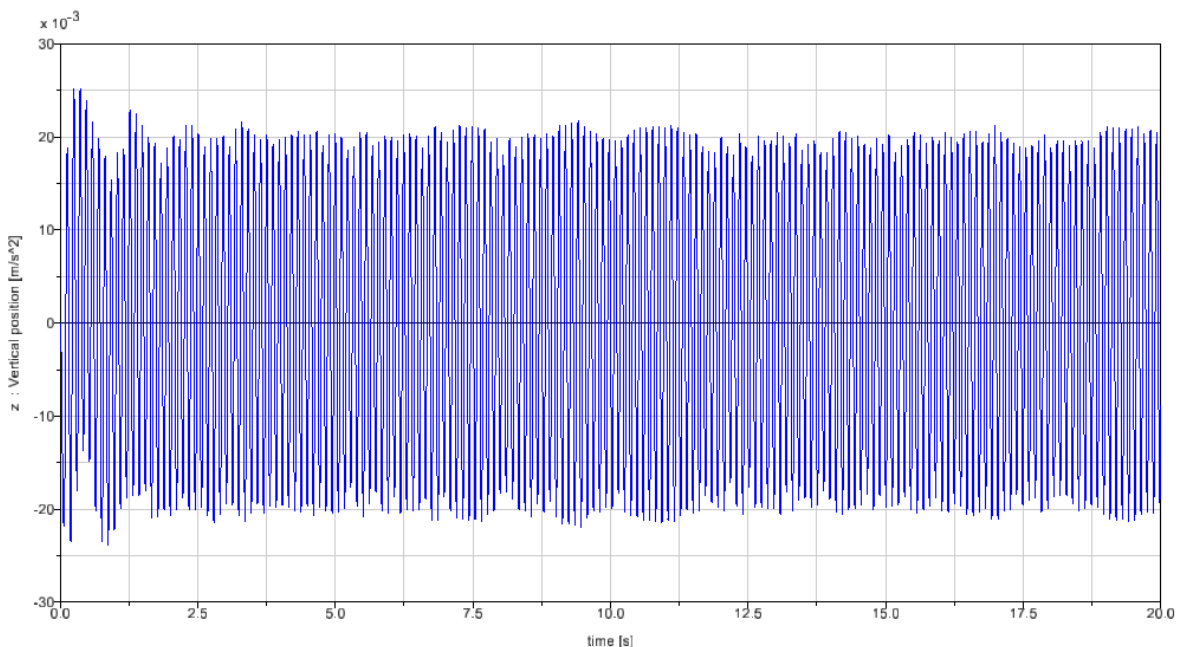


Figura 8.4. Aceleración vertical del vagón

Respecto a la aceleración, también es posible ver en la Figura 8.5, la aceleración del ángulo de cabeceo (pitch) en 20 segundos.

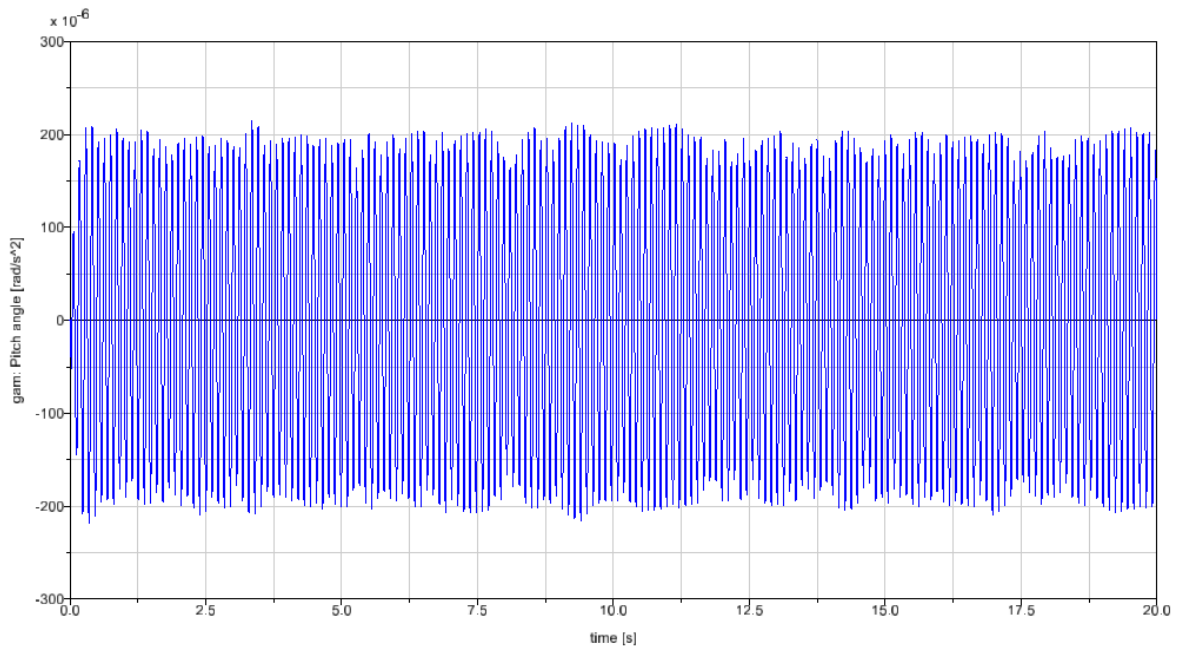


Figura 8.5. Aceleración del ángulo de cabeceo del vagón

Se pueden obtener diferentes resultados variando la excitación de la vía. Cambiando el valor de omega por uno mayor por ejemplo, para que tenga más perturbaciones por unidad de longitud, podemos ver diferentes resultados. Se van a ver los resultados, si se pone un omega de valor 3 con la forma de la Figura 8.6.

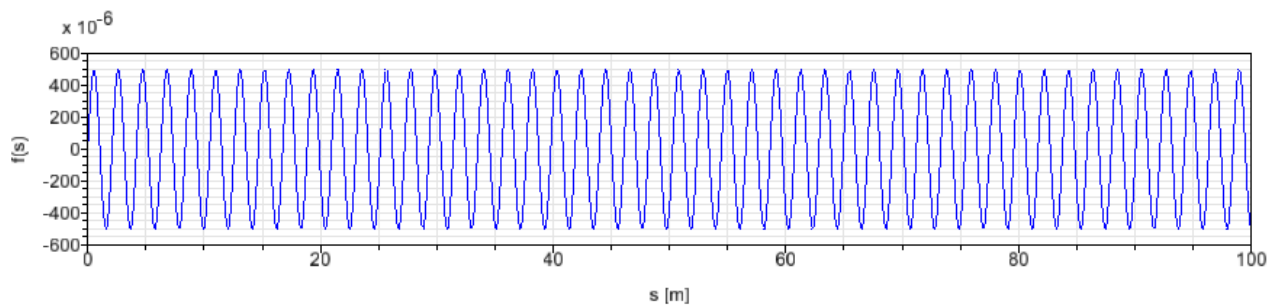


Figura 8.6. Segunda función de excitación de la vía

Con esta excitación, se ven las mismas gráficas que para la anterior excitación, comenzando por el valor de las fuerzas de salida del elemento control MatSIM para los cuatro amortiguadores (ver Figura 8.7).

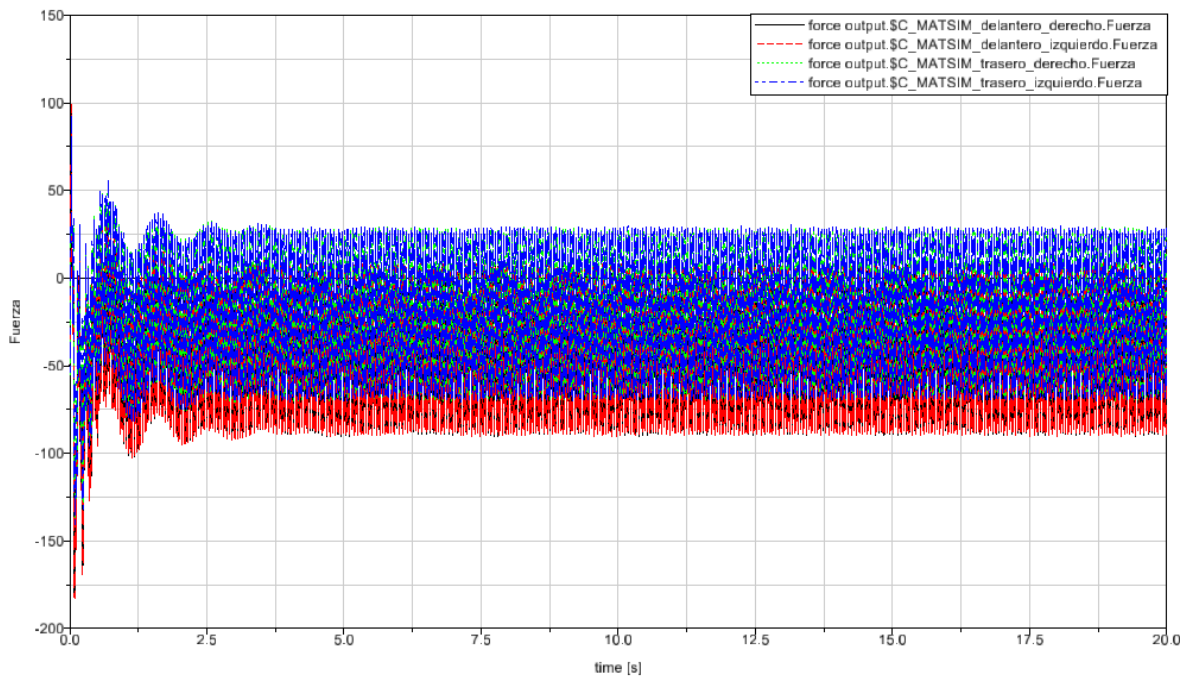


Figura 8.7. Valores de salida de las 4 fuerzas del amortiguador para segunda excitación

El movimiento vertical del vagón se muestra en la Figura 8.8.

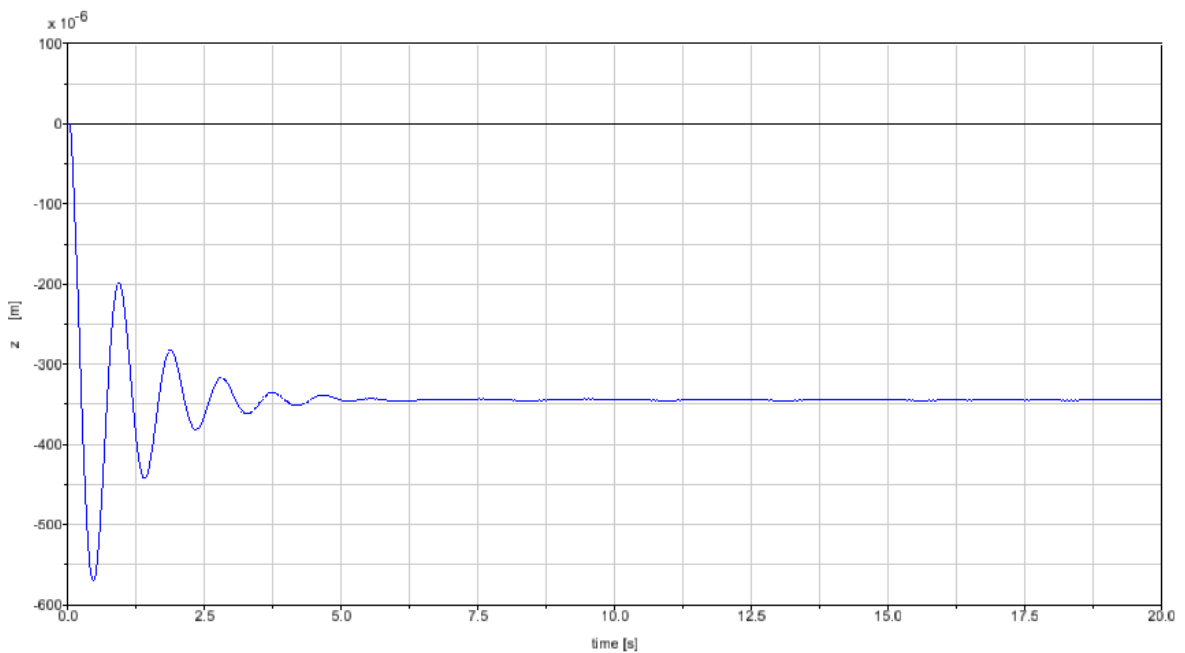


Figura 8.8. Desplazamiento vertical del vagón para segunda excitación

Y la aceleración vertical del vagón en 20 segundos es la de la Figura 8.9.

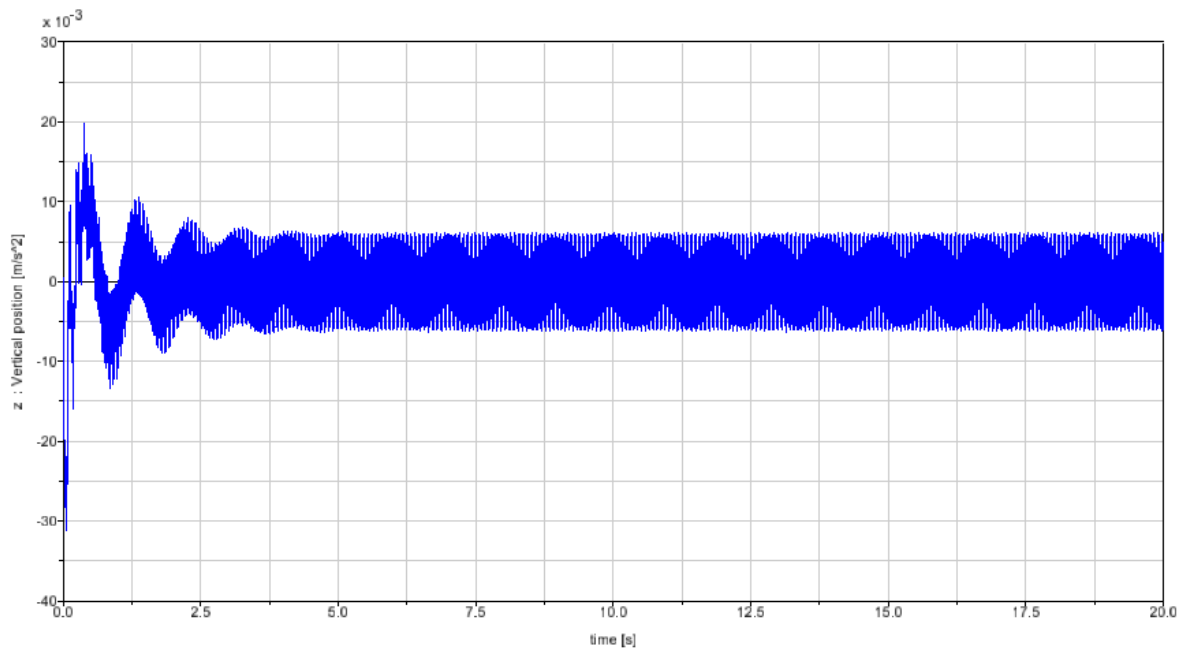


Figura 8.9. Aceleración vertical del vagón para segunda excitación

La aceleración del ángulo de cabeceo en un tiempo de 20 segundos se muestra en la Figura 8.10.

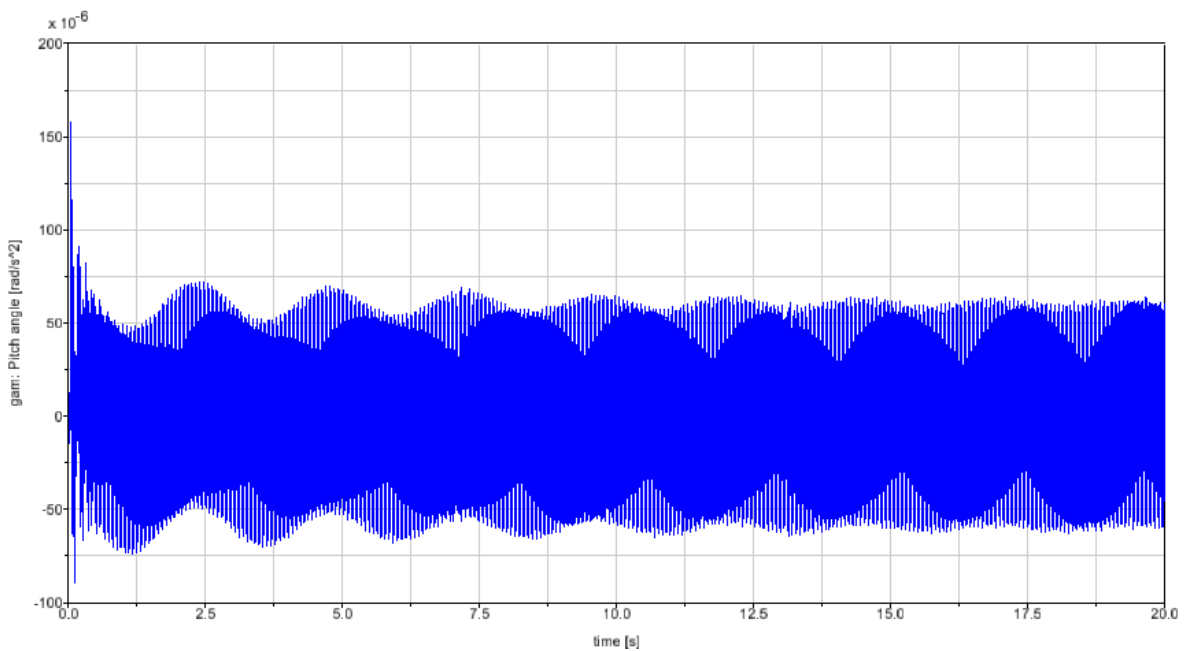


Figura 8.10. Aceleración del ángulo de cabeceo del vagón para segunda excitación

Se podría hacer una última simulación, para comparar el modelo de Simulink de 9 GDL con este, no sería un modelo exactamente comparable ya que como ya se ha comentado no son el mismo tren, pero si se puede ver qué ocurre si ponemos en el modelo de 9 GDL una perturbación de características similares a las de Simpack.

Para realizar esta simulación, se deben cambiar las perturbaciones del modelo de 9 GDL. Se usa una señal senoidal de entrada con una amplitud de 0.0005 y una frecuencia de 55.56 rad/s, ya que si hacemos el cambio de unidades se tiene:

$$1 \frac{\text{rad}}{\text{m}} \cdot 55.56 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 55.56 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Cómo se ve en la Figura 8.11, la excitación en la vía es prácticamente la misma, en primer lugar está la excitación de Simpack y en segundo lugar la que acabamos de crear:

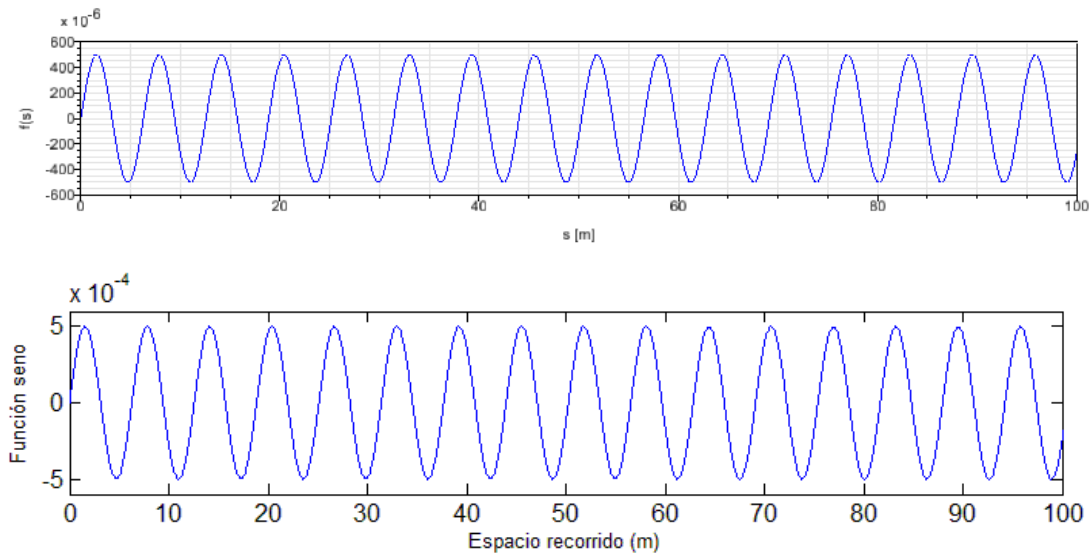


Figura 8.11. Comparación excitación de Simpack y Simulink

Ya que ambos modelos de tren no son idénticos no se puede hacer comparación exacta, sólo se hace una pequeña comparación entre los movimientos verticales del vagón obtenidos. En las Figura 8.12 y 8.13 puede verse esta comparación, primero la gráfica de Simpack (Figura 8.12) y después la de Simulink (Figura 8.13).

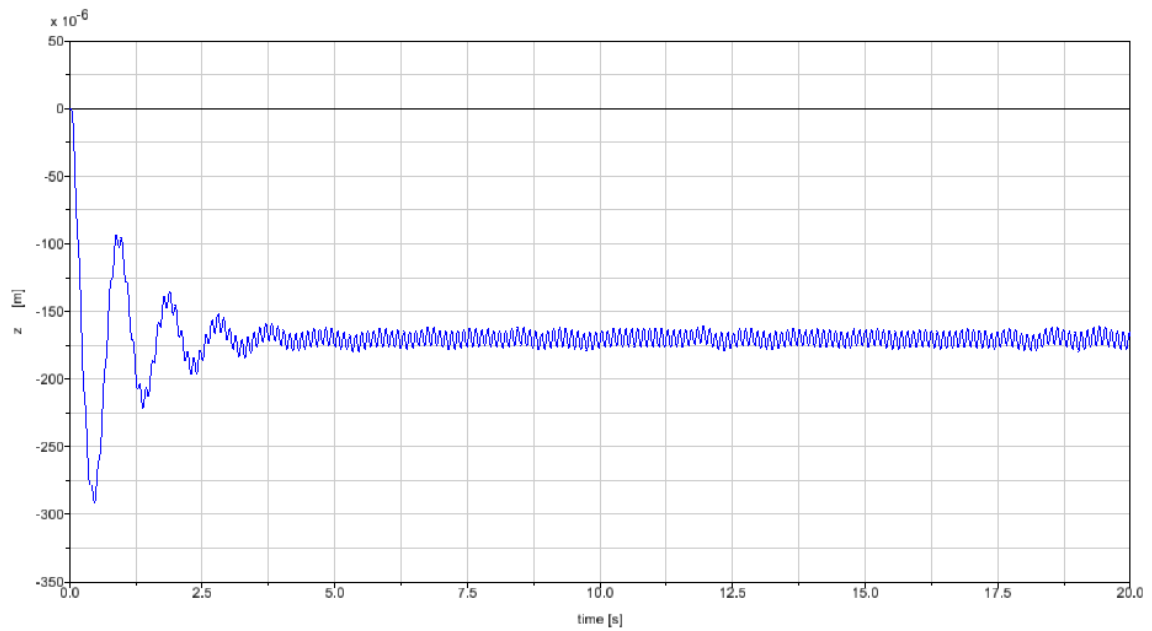


Figura 8.12. Comparación entre el modelo de Simpack y Simulink (Simpack)

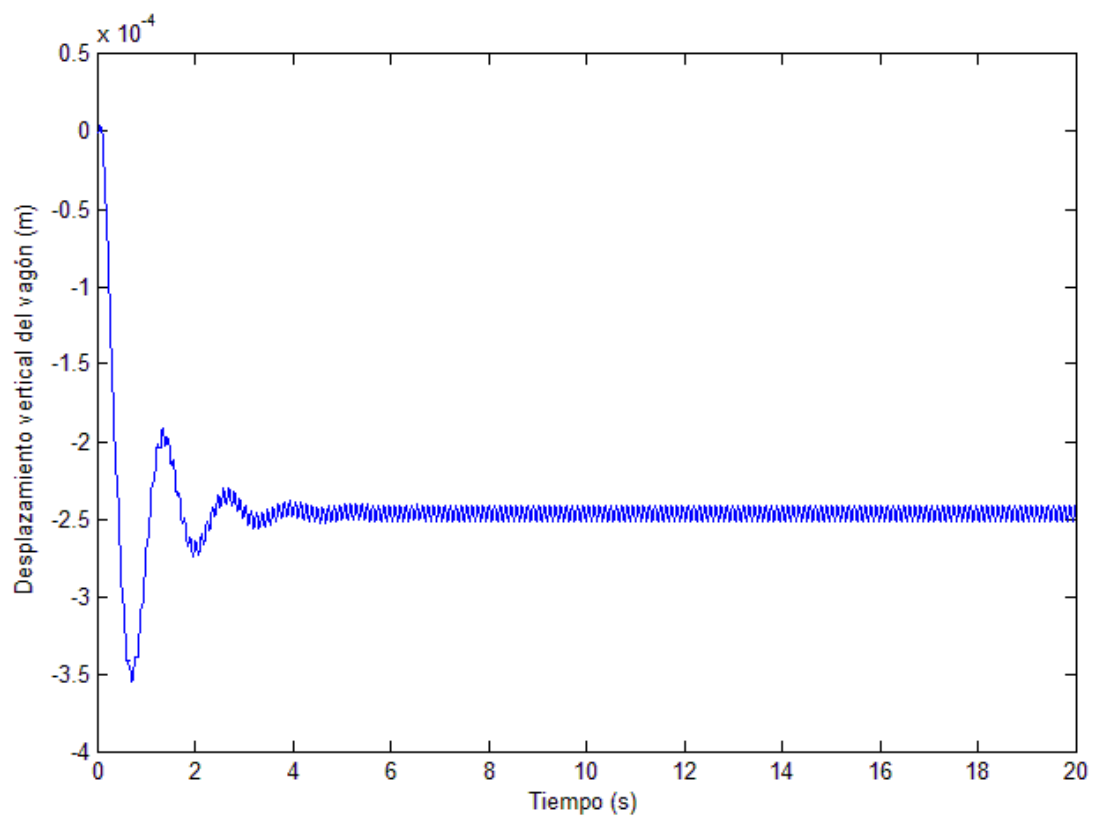


Figura 8.13. Comparación entre el modelo de Simpack y Simulink (Simulink)

8.2 Conclusiones

En este capítulo se han estudiado los resultados de la implementación del modelo en Simulink de un amortiguador MR, en el programa Simpack, de estos resultados podemos sacar las siguientes conclusiones comparando las diferentes simulaciones.

La primera gráfica que se ha obtenido, ha sido la de las fuerzas de salidas de los elementos de control de MatSIM, en donde se observa, que estas fuerzas son prácticamente iguales en los 4 casos, con unos valores comprendidos entre los 100 y 150 N con una señal de forma armónica. Si se comparan ambas simulaciones vemos que la señal alcanza un valor máximo mayor, para la simulación con el valor de omega más pequeño. Esto puede deberse a varios motivos, en la fórmula en el modelo MR de Simulink puede verse que esta depende directamente del valor de entrada, por lo que esta diferencia puede deberse a la señal de entrada al elemento MatSIM. Esta señal de entrada es la diferencia que median los dos sensores 165, se ha hecho una medición de ambas entradas y cómo puede verse en la Figura 7.11 los valores para un omega menor son mayores, aunque esto es sólo una posible causa.

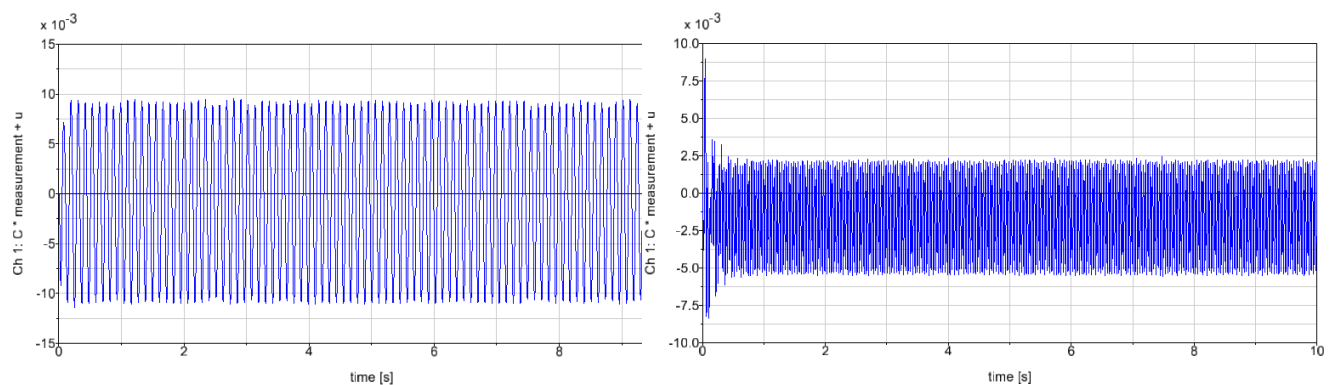


Figura 8.14. Comparación entre las señales de entrada para las dos excitaciones de la vía

Respecto al desplazamiento vertical del vagón, se ve que es un movimiento que se va atenuando, algo normal en movimientos amortiguados sometidos a estímulos sinusoidales. Comienza a estabilizarse al rededor de los 3-4 segundos, y su valor máximo es aproximadamente de $300 \cdot 10^{-6}$ m, después pueden observar pequeñas vibraciones de aproximadamente $20 \cdot 10^{-6}$ m. Lo mismo ocurre con un valor de omega mayor, la forma de la curva es la misma, sólo que los valores cambian un poco, el valor máximo es un poco mayor y empieza a estabilizarse hacia una línea mucho más definida que en el caso anterior.

Para las aceleraciones tanto del movimiento vertical, como el ángulo de cabeceo se puede decir que sus valores permanecen constantes durante la simulaciones, no hay saltos bruscos en ningún de los dos casos de omega a los que nos enfrentamos, por lo que los pasajeros no recibirán ningún cambio brusco en la aceleración del vagón

Finalmente se puede decir, que el modelo diseñado mediante el programa Simpack con amortiguadores MR cumple bastante bien como modelo de predicción de movimientos,

además los amortiguadores MR diseñados también cumplen su objetivo, reducir las vibraciones que llegan a los pasajeros.

Respecto a la pequeña comparación entre los dos modelos (9 GDL en Simulink y Simpack), se puede decir que los valores máximos y mínimos de las gráficas no son iguales, esto puede ser debido a la ya mencionada diferencia existente entre ambos trenes, no obstante la forma de la gráfica es parecida en ambos casos.

CAPÍTULO 9: Conclusiones y trabajos futuros

9.1 Conclusiones

En este Proyecto, se ha estudiado el desarrollo de un amortiguador MR mediante la herramienta Simulink y su implementación en dos programas distintos, MATLAB y Simpack.

Aunque ya se han hecho diferentes conclusiones sobre la implementación en cada programa en apartados 5.3 y 8.2, la conclusión final que se puede sacar de los resultados en este Proyecto, es que el modelo desarrollado en Simulink del amortiguador MR está bien realizado, ya que en los dos casos en los que se ha implementado, los resultados obtenidos no se ha obtenido ningún resultado fuera de lo común.

También ha quedado presente que el desarrollo en Simulink es intuitivo, y este entorno de MATLAB es fácil de utilizar y de visualizar. Aunque también es cierto que se deben realizar simulaciones que en ocasiones tardan bastante, lo cual es una desventaja. Además de que en el modelo de 9 GDL la implementación en Simulink tiene un largo desarrollo, debido a la cantidad de ecuaciones. Respecto a Simpack, aunque el modelado del vehículo no es muy laborioso, si lo es la implementación del modelo de amortiguador, ya que requiere la creación de una red neuronal.

En el futuro estos modelos podrían utilizarse en sistemas más complejos ferroviarios, o sistemas para mejorar la marcha y confort de los viajeros.

9.2 Trabajos futuros

Con los resultados y estudios del trabajo los futuros Proyectos propuestos son los siguientes:

- Un mayor ajuste a la realidad, lo que podría hacerse mejorando el modelo de tren de Simpack, o un modelo de vía que se ajuste a algo más realista. También puede hacerse incorporando un mayor número de grados de libertad en el modelo de 9 GDL.
- Un mayor número de simulaciones, en las que se incluyan más parámetros y con una irregularidades de la vía no periódicas también sería útil.
- Al igual que hicieron Spencer et. al. en su artículo Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, utilizando un amortiguador MR real realizar diferentes simulaciones con el amortiguador y después comparar los resultados con el modelo de Bouc-Wen mejorado desarrollado en Simulink.
- En este trabajo los sistemas de suspensión utilizados eran diferentes, un trabajo interesante podría ser estudiar los diferentes esfuerzos que se producen y compararlos para saber cuál tendría una mejor implementación.

CAPÍTULO 10: Planificación y Presupuesto

10.1 Planificación

La planificación es una parte importante en la realización de cualquier Proyecto, ya que garantiza el orden de las tareas, partiendo de una primera fase de documentación, y tras estudiar los resultados obtenidos se finalice con la redacción de la memoria escrita. La duración del Proyecto ha sido estimada en aproximadamente 220 días hábiles, si se supone que en un mes hay unos 20 días hábiles el tiempo total invertido sería de 11 meses. A este tiempo estimado habría que añadirle un año que debido a circunstancias personales no se pudo realizar nada del Proyecto. Las diferentes etapas del Proyecto serían:

- 1) Planteamiento (20 días): incluye las reuniones con el profesor, planteamiento de la idea a desarrollar, además del aprendizaje del programa Simpack mediante un tutorial.
- 2) Búsqueda de información (15 días): en esta etapa se incluye la búsqueda y lectura de información, en la que se recurre a libros, artículos electrónicos relacionados con el mundo ferroviario y los amortiguadores MR.
- 3) Desarrollo del modelo de amortiguador en Simulink (20 días): el objetivo de esta etapa es obtener un modelo de amortiguador operativo, incluye un aprendizaje rápido de Simulink, así como simulaciones que permitan concluir su utilidad.
- 4) Desarrollo del tren en Simpack (30 días): desarrollo del modelo de tren en Simpack, así como de la búsqueda de un método adecuado para enlazarlo con el programa Simulink.
- 5) Red Neuronal (25 días): incluye la obtención de todos los datos obtenidos con el modelo de amortiguador, su generación mediante MATLAB y su implementación en el programa Simpack.
- 6) Desarrollo del modelo de 9 GDL (25 días): elaboración mediante Simulink de todas las ecuaciones del modelo de 9 GDL.
- 7) Simulaciones con Simpack (20 días): esta etapa incluye todas las simulaciones realizadas incluidas las erróneas para la comprobación del programa.
- 8) Simulaciones con Simulink (20): al igual que con Simpack, estas simulaciones tardan bastante en realizarse, sobre todo para simulaciones con tiempos largos.
- 9) Desarrollo de la memoria final (45 días): incluye la escritura de todas las páginas capturas de las imágenes y elaboración de las gráficas, así como la edición del texto.

Es importante destacar, que estas etapas podrían solaparse si fuese necesario, por ejemplo durante el tiempo que exigen las simulaciones podría escribirse la memoria final, pero no es algo que haremos en el siguiente diagrama de Gantt, que nos permite visualizar la colocación y duración de las tareas:

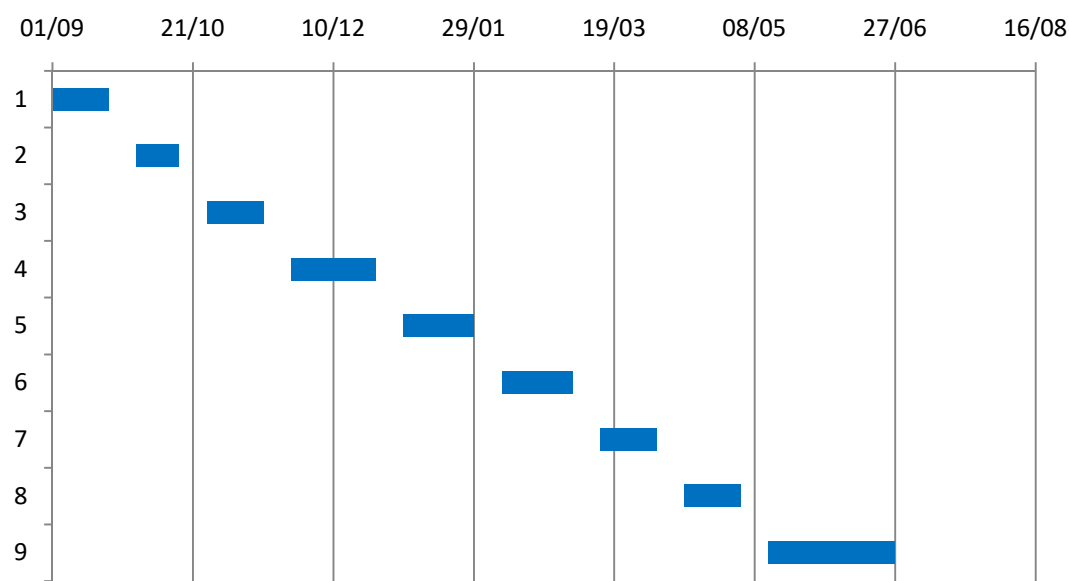


Figura 10.1. Diagrama de Gantt del Proyecto

10.2 Análisis de costes

Para hacer un análisis de costes del Proyecto se analizan los costes en dos apartados, personal, material que incluye el equipo y el software.

Para el coste del personal, se divide el coste en dos partes, una con el coste que conllevan las simulaciones y demás, a este coste se le llama coste de ingeniería, y el segundo coste sería el de la realización de la memoria final del Proyecto.

Para el coste del material, se dividen entre costes de equipos, que incluyen todo el soporte físico del trabajo, y coste del software en donde se incluyen todos los programas utilizados en el trabajo.

Coste de Personal:

Tabla 10.1. Costes del personal

Concepto	Tiempo invertido (h)	Precio (€/h)	Coste (€)
Ingeniería	350	30	10500
Memoria escrita	90	20	1800
			12300 €

Coste Material:

Tabla 10.2. Coste del soporte físico

Soporte Físico			
Concepto	Coste (€)	Tiempo usado (días)	Coste en proporción de su uso (€)
Equipo informático A	800	60	218.16
Equipo informático B	800	160	581.84
Memoria externa (Pendrive de 32 Gb)	12	220	12
			812 €

Tabla 10.3. Coste del soporte informático

Soporte Informático			
Concepto	Coste (€)	Tiempo usado (días)	Coste en proporción de su uso (€)
Microsoft Office 2007	150	45	30.68
Licencia de MATLAB	2000	70	636.36
Licencia de Simpack	3000	50	681.81
			1348.85 €

Estos son los costes directos del Proyecto, si no consideramos los costes indirectos el resumen de los costes nos quedaría así:

Tabla 10.4. Coste total

Tipo de coste	Coste (€)
Personal	12300
Soporte físico	812
Soporte informático	1348.85
	14460.85 €

El coste total del Proyecto es de catorce mil cuatrocientos sesenta con ochenta y cinco céntimos.

ANEXO A: Construcción y datos del tren

En este apartado se detalla la construcción del modelo de vehículo en el módulo Pre, empezando desde la construcción del bogie hasta el modelado del cuerpo del vehículo y su posterior unión con los bogies.

- **Juego de ruedas:**

Lo primero que se debe crear es la subestructura juego de ruedas con un modelo de tipo 'Rail Wheelset', a este juego de ruedas se le llama WS y para conectarlo con la suspensión se crean 4 marcadores IdentityMatrix que se pueden ver la Tabla A.1.

Tabla A.1. Marcadores de la suspensión primaria

Marcador	(x, y, z)
PSR (Primary Spring Right)	(0, 1, 0)
PSL (Primary Spring Left)	(0, -1, 0)
PDR (Primary Damper Right)	(0, 1, 0)
PDL (Primary Damper Left)	(0, -1, 0)

- **Bogie:**

Con un modelo Rail Track se inicia la creación del bogie. Lo primero que se crea, la subestructura WSR, a partir del juego de ruedas que ya se tiene, que será el juego de ruedas trasero, y el WSF que será el delantero.

Se deben mover ambas estructuras, y para ello se modifica el valor de la posición longitudinal en cada juegos de ruedas" Joint Properties", para WSF: 1.28 y para WSR: -1.28.

El programa crea un elemento automáticamente llamado Body, se renombra como bogie y se modifican los valores de masa y momentos de inercia como se muestran en la Figura A.1.

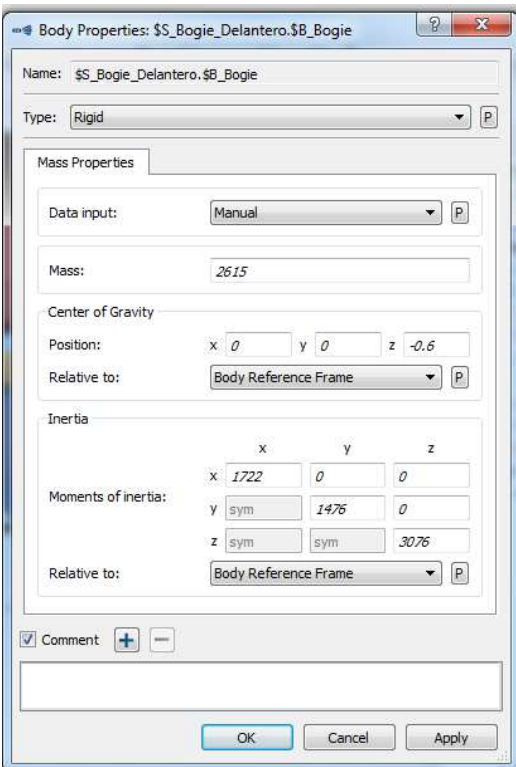


Figura A.1. Momentos de inercia y centro de gravedad del bogie

Además hay que modificar los valores del cuerpo del bogie para que se adecuen a los valores que se quieren, son los que se muestran en la Figura A.2.

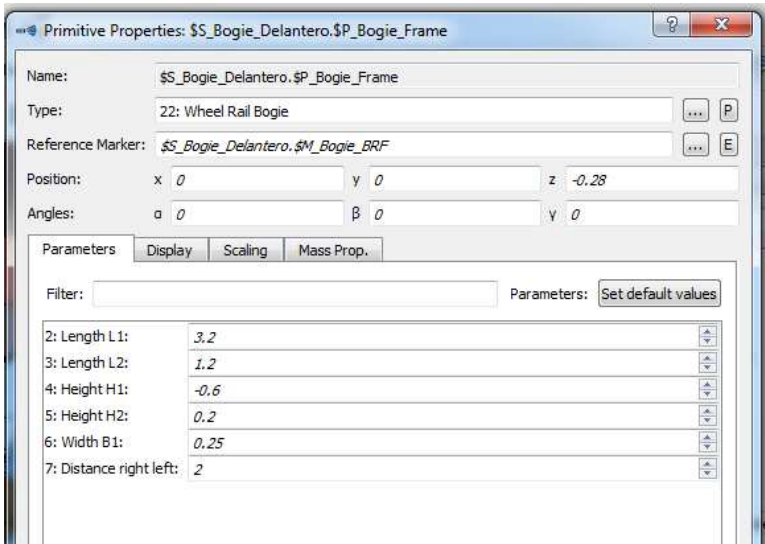


Figura A.2. Propiedades del cuerpo bogie

Para unirlo con la suspensión, se deben crear los correspondientes marcadores que se nombra según la Tabla A.2.

Tabla A.2. Posiciones de los marcadores de la suspensión

Marcador	Posición
PrimSpring_FR	(1.28, 1, -0.88)
PrimSpring_FL	(1.28, -1, -0.88)
PrimSpring_RR	(-1.28, 1, -0.88)
PrimSpring_RL	(-1.28, -1, -0.88)
PrimDamp_FR	(1.28, 1, -0.88)
PrimDamp_FL	(1.28, -1, -0.88)
PrimDamp_RR	(-1.28, 1, -0.88)
PrimDamp_RL	(-1.28, -1, -0.88)
SecSpringR	(0, 1, -0.525)
SecSpringL	(0, -1, -0.525)
SecDampLatR	(0, 0.23, -0.7)
SecDampLatL	(0, -0.23, -0.7)
SecDampVertR	(0, 1.3, -0.4)
SecDampVertL	(0, -1.3, -0.4)
SecRoll	(0, 0, -0.8725)
TractionRod	(0, 0, -0.6)
Bumpstop	(0, 0, -0.65)

- **Cabezal fijo**

Este cuerpo, llamado dummy, que está fijo al vehículo permite unir bogie y vehículo. Se debe modificar, su primitiva, y comprobar y que el cuerpo tiene cero grados de libertad y ningún movimiento. Para conectar este dummy con la amortiguación, se necesitan en total 6 marcadores de tipo IdentityMatrix, 4 para amortiguadores verticales y laterales y 2 para la secundaria que se ven en la Tabla A.3.

Tabla A.3. Marcadores del dummy

Marcador	Posición
SecR	(0, 1, -1.13)
SecL	(0, -1, -1.13)
DampRVert	(0, 1.3, -0.925)
DampLVert	(0, -1.3, -0.925)
DampRLat	(0, 0.665, -0.7)
DampLLat	(0, -0.665, -0.7)
SecRoll	(0, 0, -0.8725)
Bumpstop	(0, 0, -0.65)
TractionRodF	(1.2, 0, -0.6)
TractionRodR	(-1.2, 0, -0.6)

- **Suspensión primaria**

Se debe distinguir en la nomenclatura entre muelle (spring) y amortiguador (damp), nombrados además con dos letras, la primera según sea trasero R y delantero F, y la segunda según sea derecho R e izquierdo L. Por ejemplo el elemento PrimSpring_FR, es el muelle correspondiente a la rueda delantera derecha.

Para la creación de los muelles utilizamos elementos del tipo Force Element con una longitud en la dirección z de 0.42 metros, y con las características que se muestran en la Figura A.3.

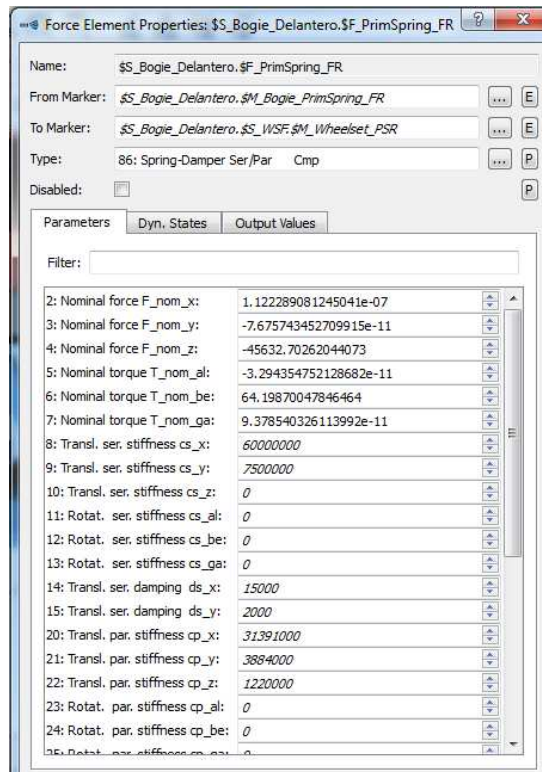


Figura A.3. Propiedades de los muelles de la suspensión primaria

Para los amortiguadores, se utiliza un elemento de tipo 6, en los cuales es necesario definir la función por la que se guían estos amortiguadores, se importa la función que da el comportamiento del amortiguador, cargándola en el campo Input Function donde se carga la función correspondiente. En el caso I_PrimDamper es la función, y en Simpack estas funciones pueden cargarse desde un archivo, o hacerla manualmente, el programa también permite la visualización de esta función en un cuadro anexo, en este caso la función es la que se muestra en la Figura A.4.

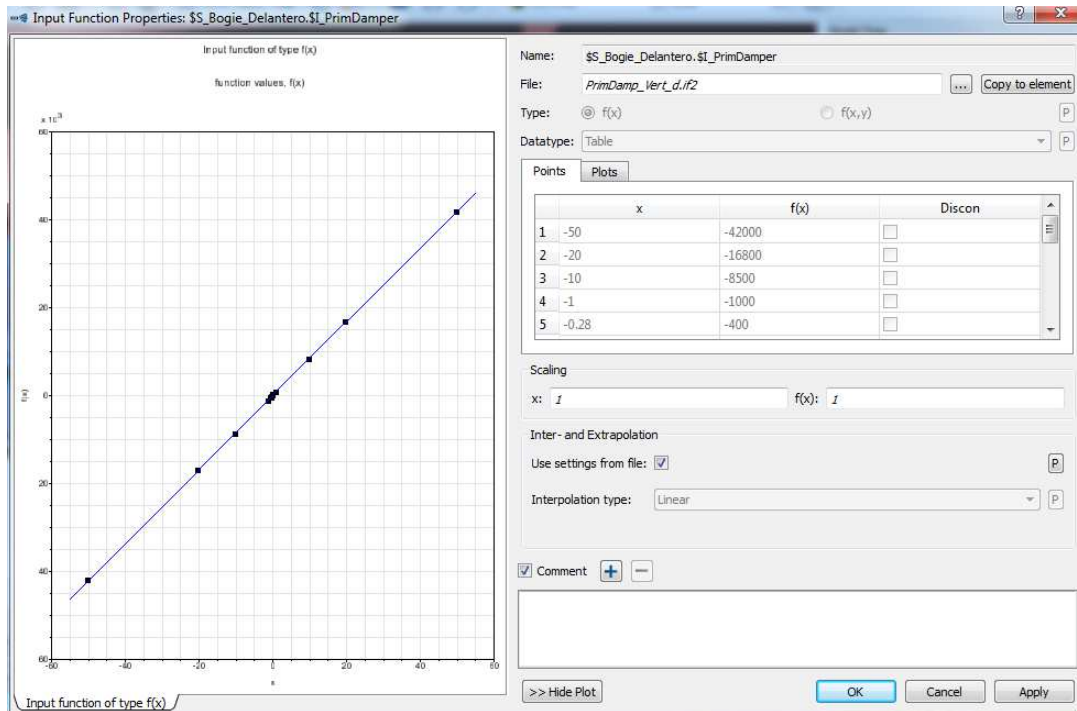


Figura A.4. Función $I_PrimDamper$

Finalmente el amortiguador queda como se ve en la Figura A.5.

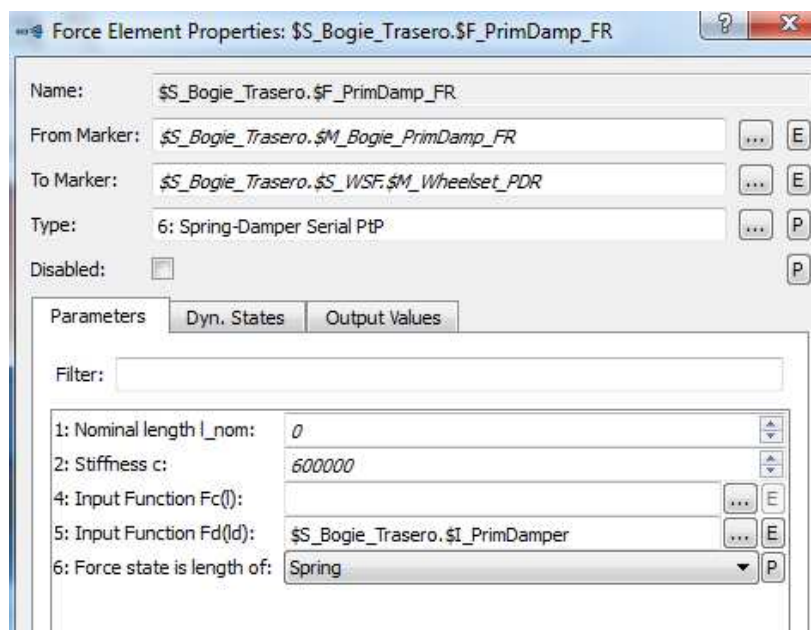


Figura A.5. Propiedades del amortiguador de la suspensión primaria

- **Suspensión secundaria**

Con elementos de tipo Force Element 79, se crean los muelles izquierdo y derecho F_SecL F_SecR con los valores de la Figura A.6.

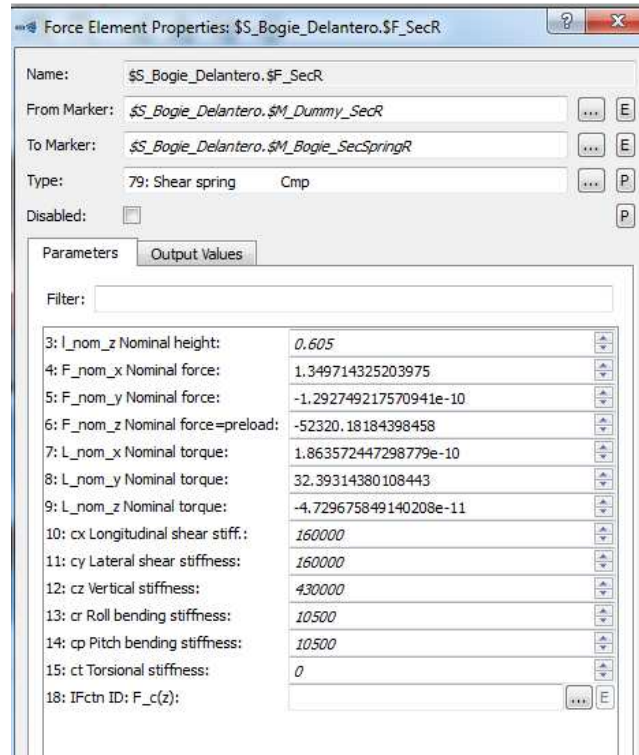


Figura A.6. Propiedades de los muelles de la suspensión secundaria

Para el amortiguador lateral, se debe usar una función (l_DampLat) que da el comportamiento del amortiguador, y para ello se usa un elemento de tipo Input Function con nombre l_DampLat, tanto para el lado derecho como el izquierdo. El procedimiento es el mismo que para los amortiguadores verticales de la suspensión primaria.

Los amortiguadores verticales de la suspensión secundaria, son los amortiguadores MR, que al contrario que en la suspensión secundaria, que eran de tipo 6 estos son de tipo 110, y se deben utilizar en ellos una función que facilite la fuerza que actúa sobre ellos, con la medición de los correspondientes sensores.

También es necesario modelar la barra antitorsión y el "bumpstop". Para la barra antitorsión se utilizará un Force Element de tipo 13, mientras que el bumpstop utiliza el mismo proceso que para los amortiguadores verticales de la suspensión primaria, se usa la función l_BumpStop, ambos quedan como se ve en la Figura A.7.

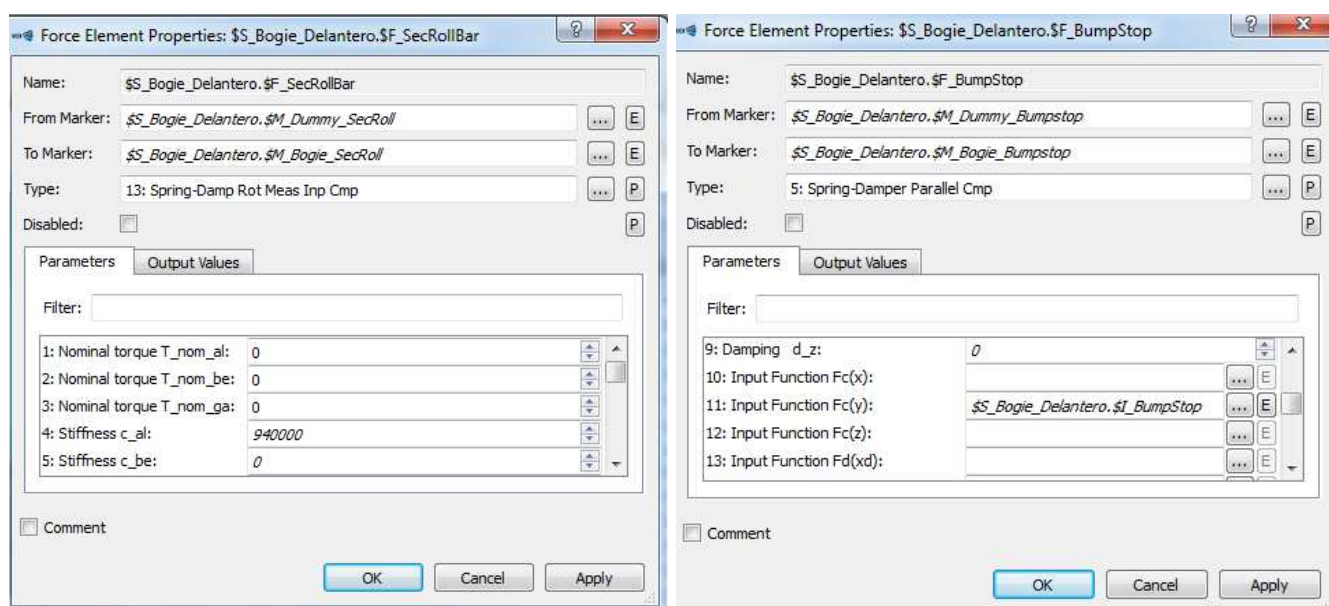


Figura A.7. Propiedades de la barra antitorción y el "bumpstop"

- **Cuerpo del vehículo**

Para la creación del vehículo ferroviario se crea un modelo de tipo Rail Track, en este modelo se deben crear dos subestructuras que serán el bogie anterior ya creado, que irán como bogie delantero y trasero posicionando tanto la estructura del bogie como las ruedas, para tenerlas donde corresponde según la longitud del vagón que deseamos, siendo esta separación de 28 metros.

De entre las propiedades que se deben dar a este vagón, están los momentos de inercia que se refieren al centro del gravedad, en las siguientes figuras (Figura A.8 y Figura A.9) se muestran todas las características referentes a este modelo

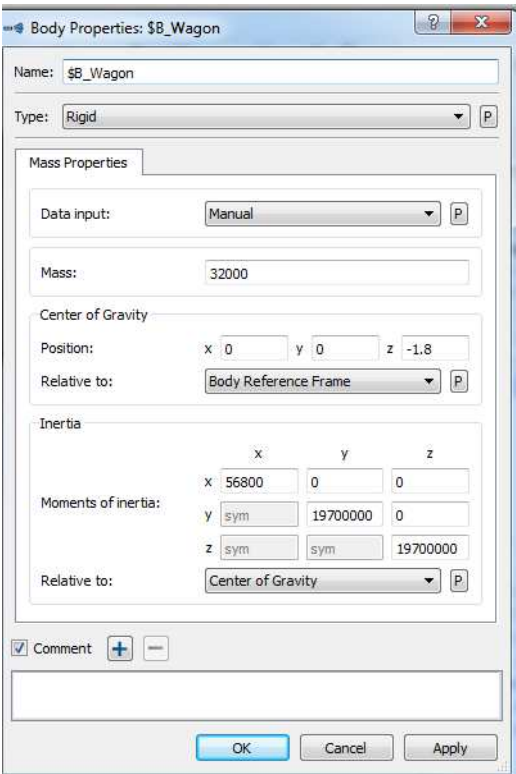


Figura A.8. Momentos de inercia y centro de gravedad del vagón

La propiedades geométricas del vagón son las de la Figura A.9.

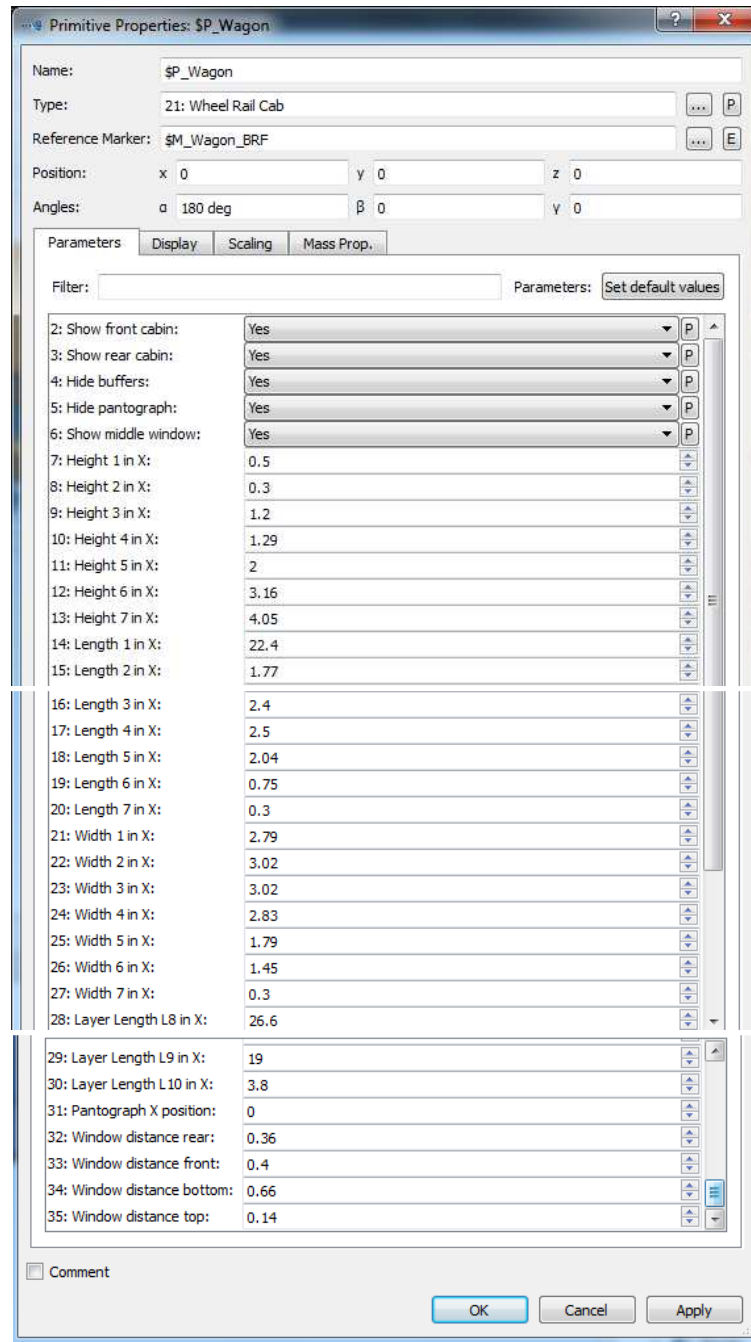


Figura A.9. Propiedades del vagón

Algo importante a tener en cuenta es la unión de este cuerpo del vehículo con los bogies, por eso se tiene una articulación (Joint)(ver Figura A.10) para el vagón de tipo 7 (General Rail Track Joint), además de los marcadores para los bogies delantero y trasero, cuyas posiciones son (9.5, 0, 0) y (-9.5, 0, 0).

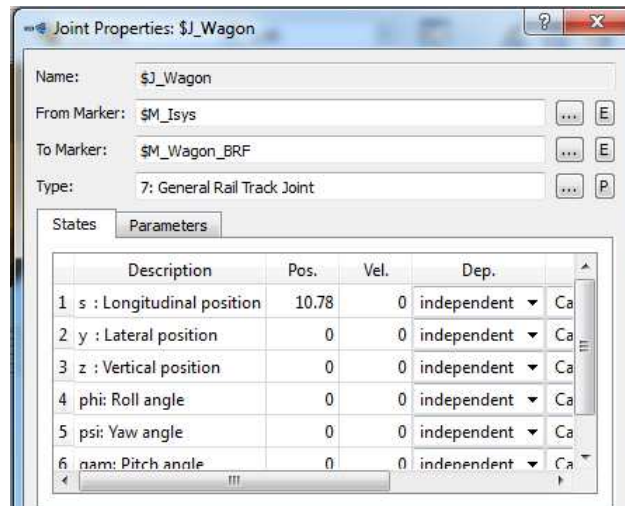


Figura A.10. Joint del vagón

Importante también referenciar el Joint del dummy en cada bogie con el vagón, poniendo en la opción From Marker el marcador del vagón para cada bogie (ver Figura A.11)..

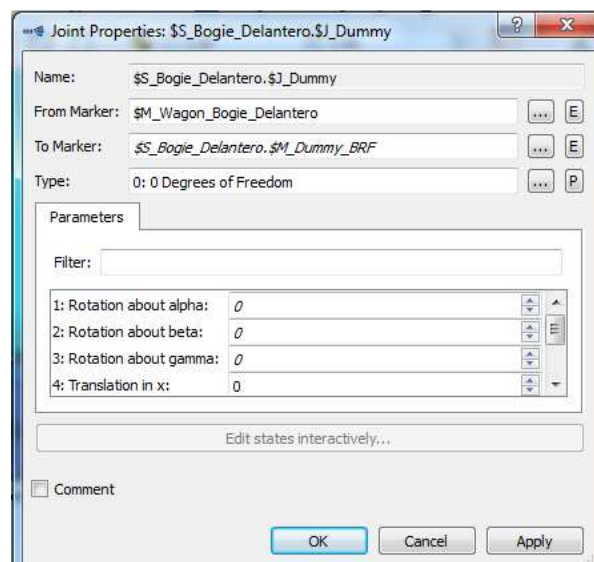


Figura A.11. Joint del dummy

Una vez se tiene terminado el modelo se debe dar una velocidad al modelo y realizar la precarga del modelo, para poder obtener resultado y ya se tiene el modelo de un tren típico terminado.

ANEXO B: Fórmulas de un modelo de 9 GDL

$$F_{sxlr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}) \quad (\text{Ec. 38})$$

$$F_{sxll} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}) \quad (\text{Ec. 39})$$

$$F_{sxtr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}) \quad (\text{Ec. 40})$$

$$F_{sxtl} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}) \quad (\text{Ec. 41})$$

$$F_{sytr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}) \quad (\text{Ec. 42})$$

$$F_{syll} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}) \quad (\text{Ec. 43})$$

$$F_{sytr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}) \quad (\text{Ec. 44})$$

$$F_{sytl} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}) \quad (\text{Ec. 45})$$

$$F_{szlr} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \quad (\text{Ec. 46})$$

$$F_{szll} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} - d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} - d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \quad (\text{Ec. 47})$$

$$F_{sztr} = -k_{sz}[z_c + l\varphi_c - z_{t2} + d_s(\theta_c - \theta_{t2})] - c_{sz}[\dot{z}_c + l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t2} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t2})] \quad (\text{Ec. 48})$$

$$F_{sztl} = -k_{sz}[z_c + l\varphi_c - z_{t2} - d_s(\theta_c - \theta_{t2})] - c_{sz}[\dot{z}_c + l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t2} - d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t2})] \quad (\text{Ec. 49})$$

$$F_{px1r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$F_{px1l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \quad (\text{Ec. 51})$$

$$F_{px2r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \quad (\text{Ec. 52})$$

$$F_{px2l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \quad (\text{Ec. 53})$$

$$F_{px3r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$F_{px3l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$F_{px4r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \quad (\text{Ec. 56})$$

$$F_{px4l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$F_{py1r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$F_{py1l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \quad (\text{Ec. 59})$$

$$F_{py2r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$F_{py2l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \quad (\text{Ec. 61})$$

$$F_{py3r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \quad (\text{Ec. 62})$$

$$F_{py3l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \quad (\text{Ec. 63})$$

$$F_{py4r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \quad (\text{Ec. 64})$$

$$F_{py4l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \quad (\text{Ec. 65})$$

$$F_{pz1r} = -k_{pz} \left(z_{t1} - b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a} z_{1r} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{1r} \right) \quad (\text{Ec. 66})$$

$$F_{pz1l} = -k_{pz} \left(z_{t1} - b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a} z_{1l} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{1l} \right) \quad (\text{Ec. 67})$$

$$F_{pz2r} = -k_{pz} \left(z_{t1} + b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a} z_{2r} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{2r} \right) \quad (\text{Ec. 68})$$

$$F_{pz2l} = -k_{pz} \left(z_{t1} + b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a} z_{2l} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{2l} \right) \quad (\text{Ec. 69})$$

$$F_{pz3r} = -k_{pz} \left(z_{t2} - b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a} z_{3r} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{3r} \right) \quad (\text{Ec. 70})$$

$$F_{pz3l} = -k_{pz} \left(z_{t2} - b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a} z_{3l} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{3l} \right) \quad (\text{Ec. 71})$$

$$F_{pz4r} = -k_{pz} \left(z_{t2} + b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a} z_{4r} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{4r} \right) \quad (\text{Ec. 72})$$

$$F_{pz4l} = -k_{pz} \left(z_{t2} + b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a} z_{4l} \right) - c_{pz} \left(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a} \dot{z}_{4l} \right) \quad (\text{Ec. 73})$$

Siendo los valores de todas las constantes para las ecuaciones anteriores las de la Tabla B.1.

Tabla B.1. Parámetros del vehículo

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
m_c	$3.96 \times 10^4 \text{ kg}$	m_t	$3.25 \times 10^3 \text{ kg}$	V	55.56 m/s
I_{cx}	$8.85 \times 10^4 \text{ kg m}^2$	I_{cy}	$2.46 \times 10^6 \text{ kg m}^2$	I_{cz}	$2.505 \times 10^6 \text{ kg m}^2$
I_{tx}	$3.06 \times 10^3 \text{ kg m}^2$	I_{ty}	$3.02 \times 10^3 \text{ kg m}^2$	I_{tz}	$4.27 \times 10^3 \text{ kg m}^2$
k_{px}	$4.00 \times 10^6 \text{ N/m}$	k_{py}	$3.25 \times 10^6 \text{ N/m}$	k_{pz}	$7.00 \times 10^5 \text{ N/m}$
c_{px}	0	c_{py}	0	c_{pz}	$1.50 \times 10^4 \text{ N s/m}$
k_{sx}	$1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	k_{sy}	$1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	k_{sz}	$2.90 \times 10^5 \text{ N/m}$
c_{sx}	0	c_{sy}	$5.00 \times 10^4 \text{ N s/m}$	c_{sz}	0
h_{ts}	0.217 m	h_{cs}	1.207 m	h_{tp}	-0.452 m
h_{wp}	0.180 m	l	9.00 m	a	0.7465 m
d_s	1.00 m	b	1.25 m	d_p	1.00 m

Bibliografía

- [1] González Fernández, F.J., Fuentes Losa, J. (2010). *Ingeniería ferroviaria*. Segunda edición. Madrid: Universidad Nacional Educación a Distancia.
- [2] FEVE. *Historia del ferrocarril: FEVE – Geografía Ferroviaria* [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.feve.es/recursos/doc/empleo/historia-del-ferrocarril-feve-geografia-ferroviaria.pdf>
- [3] García Utrera, J. L. *El AVE Madrid-Lisboa por Extremadura: Efectos territoriales y diferentes alternativas* [archivo PDF]. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6281/6/05.pdf>
- [4] Varios autores. *Rocket* [recurso en línea]. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.ferropedia.es/wiki/Rocket>
- [5] Berbey, A., Caballero, R., Sanz Bobi, J. D., Brunel, J., Guerra, K., Flores, J., Samaniego, A., Orozco, W. (2013) Trenes: material rodante del transporte ferroviario. *Prisma Tecnológico*. 4(1), 33-37. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: http://www.utp.ac.pa/documentos/2014/pdf/11_Trenes_1.pdf
- [6] Álvarez Mántaras, D., Luque Rodríguez, P. *Ferrocarriles: ingeniería e infraestructura de los transportes*. Universidad de Oviedo Servicio de Publicaciones.
- [7] Orlova, A., Boronenko, Y. (2006) *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Editado por: Simon Iwnicki. Publicado por: Taylor & Francis Group.
- [8] Díaz López, V., Olmeda Santamaría, E., Gauchía Babé, A., García-Pozuelo Ramos, D., López Boada, B., López Boada, M. J., Fuentes Losa, J. (2012). *Automóviles y ferrocarriles*. Primera edición. Madrid: Universidad Nacional Educación a Distancia.
- [9] *Material rodante ferroviario*. Material de la clase Ferrocarriles. Universidad Carlos III.
- [10] Jurado Zurro, J. (2010) Estudio del Comportamiento Dinámico de un Vehículo Ferroviario Equipado con Suspensión Secundaria Semiactiva Utilizando Lógica Difusa. (Proyecto Fin de Carrera). Universidad Carlos III, Madrid.
- [11] Hurel Ezeta, J., Mandow, A., García Cerezo, A., (2013). Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*. 10(2), 1-12. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-automatiza-e-informatica-331-articulo-los-sistemas-suspension-activa-semiactiva-S1697791213000034?referer=buscador>
- [12] Cupich Rodríguez, M., Elizondo Garza, F. J., (1998) Amortiguadores magnetoreológicos. *Ingenierías*. 1(2) 50-54. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://ingenierias.uanl.mx/2/index.html>

- [13] Baranwal, D., Dr. Deshmukh, T.S. (2012). MR-Fluid Technology and Its Application- A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2(12), 563-569. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: http://www.ijetae.com/files/Volume2Issue12/IJETAE_1212_99.pdf
- [14] Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), Fundación OPTI. (2011). Informe de prospectiva de nuevos materiales inteligentes. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://icono.fecyt.es/informesypublicaciones/Documents/MaterialesInteligentes.pdf>
- [15] Kciuk, M., Turczyn, R. (2006). Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 18(1-2), 127-130. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.journalamme.org/>
- [16] Spaggiari, A. (2013). Properties and applications of Magnetorheological fluids. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 23, 57-61. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.gruppofrattura.it/ors/index.php/fis/article/view/IGF-ESIS.23.06>
- [17] Rojas, O., Briceño, M.I., Avendaño, J., (2012). *Fundamentos de Reología*. (Cuaderno FIRP). Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos. Universidad de Los Andes, Venezuela. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S521C.pdf>
- [18] Ramírez Navas, J. S., (2006) Introducción a la reología de los alimentos. Revista ReCiTeIA. 6(1), 1-46. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://revistareciteia.es.tl/A%F1o-6-v-6-n-1.htm>
- [19] Sleiman, H. (2010). *Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique pour l'automobile*. (Tesis de Doctorado). Arts et Métiers ParisTech, París. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/These_Hussein_Sleiman.pdf
- [20] Liado, W.H, Wang, D. H., (2003) Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 14(3) 161-172. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://jim.sagepub.com/cgi/content/abstract/14/3/161>
- [21] The MathWorks. *Simulink*. [Última consulta: 26/09/2016]. Consultado en: <http://es.mathworks.com/products/simulink/>
- [22] Plata Cheje, R. W., (2008) Matlab & Redes Neuronales. *RITS*. n.1 90-96. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rits/n1/n1a24.pdf>

- [23] Izaurieta, F., Saavedra, C. *Redes Neuronales Artificiales*. Departamento de Física de la Universidad de Concepción (Chile). Recuperado de: <http://www.uta.cl/charlas/volumen16/Indice/Ch-csaavedra.pdf>
- [24] Grupo Histología. *Neuronas*. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: <http://histologiaub.blogspot.com.es/p/morfologia.html>
- [25] Match, D. J., (2001) *Redes Neuronales: Conceptos Básicas y Aplicaciones*. (Cátedra: Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos – Orientación I). Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograias/match-redesneuronales.pdf
- [26] The MathWorks. Ayuda integrada de MATLAB.
- [27] SIMPACK Documentation. Ayuda integrada de Simpack
- [28] Rao, S. S.,(2011). *Mechanical Vibrations*. Quinta edición. Prentice Hall. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: https://aerocastle.files.wordpress.com/2012/10/mechanical_vibrations_5th-edition_s-s-rao.pdf
- [29] Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., Carlson, J.D., (1996). Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. [Última consulta: 26/09/2016]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/238073569_Phenomenological_Model_of_a_Magnetorheological_Damper

